

# Sturmbrandungsphänomene an der Westküste der Insel Sylt

VON FRITZ BÜSCHING

## Z u s a m m e n f a s s u n g

Auf der Grundlage vorhandener Sturmflut-Messdaten aus dem Bereich der Uferlinie vor Westerland werden Gegebenheiten der Sturmbrandung am Modell resonanter Beckenschwingungen hinsichtlich der Ausprägung von Reflexion, Resonanz und anomaler Dispersion untersucht.

Im Unterschied zu diesbezüglichen früheren Publikationen, die den Effekt der anomalen Dispersion (ADE) bezüglich eines vorgegebenen Frequenzbandes als *globales* Phänomen behandelt hatten, ist das Augenmerk auf *ausgezeichnete* Resonanzstellen der spektralen Peaks gerichtet. Letztere sind jeweils durch einen maximalen Gradienten  $dc/df > 0$  gekennzeichnet, womit die Analogie zur *Resonanzabsorption elektromagnetischer Wellen* noch dezidiert erfüllt ist. Hinsichtlich der *Positionierung* partiell stehender Wellen als Elemente resonanter Beckenschwingungen werden dabei zwei unterschiedliche Modellvorstellungen unterschieden.

In der *Natur*: die Resonanz der *von See kommenden Wellen* (Erreger) mit *partiell stehenden Halbwellen* in einem *abgrenzbaren Beckenvolumen* (Resonator) und

im *verkleinerten Modell*: die Resonanz des *Wellenerzeugers* (Erreger) mit *partiell stehenden Viertelwellen im Wellenkanal* (Resonator).

Neben multimodalen Energiedichtespektren können auch breite *monomodale* Energiedichtespektren bei resonanten Beckenkonfigurationen *mehrere benachbarte* Resonanzstellen repräsentieren, wobei zugehörige Abschnitte anomaler und normaler Dispersion im *gesamten Frequenzbereich hoher Energiedichten* einander abwechseln.

Das Auftreten partiell stehender Wellen bedeutenden Ausmaßes *unterstützt* die These des Autors von der „Sturmwellenresonanz“. Örtliche Abbruchraten von der Randedüne Westerland werden für extreme Sturmflutwasserstände zu 1,5m/h abgeschätzt.

## S u m m a r y

*Based on existing surge data measured in the coastal area of Westerland/ Sylt, physical principles of storm surf are investigated using the model of resonant basin oscillations including reflection and anomalous dispersion phenomena. Contrary to respective previous publications, which are dealing with the averaged anomalous dispersion effect (ADE) considering nearly the whole energy containing frequency range, particular attention has been paid on special spots of resonance. The latter are characterized by maximum gradients  $dc/df > 0$ , which even better comply with the analogue of resonant absorption of electromagnetic waves.*

*Two different model conceptions had been found appropriate with respect to (partial) standing waves forming elements of resonant basin oscillations.*

*In natural field conditions: Incident waves from the sea (stimulator) resonating with partial standing half-waves in a definable water basin (resonator), and*

*in a scale model: The wave maker (stimulator) resonating with partial standing quarter-waves in the wave tank (resonator).*

*At high energetic storm surges, besides multimodal energy spectra even a broad unimodal energy-spectrum can be represented by multiple neighboring spots of resonances together with alternating sequences of normal and anomalous dispersion.*

*The occurrence of partial standing waves of considerable extent is supporting the author's finding of a „storm wave resonance“. Local sand removal rates have been estimated as 1.5m/h at heavy storm surges.*

## Keywords

*Partial reflection, resonance, storm surge, surf zone, dune, sand removal, co-cumulative spectrum, energy spectrum, anomalous dispersion.*

## Inhalt

1. Einführung
2. Resonante Beckenschwingungen an natürlichen Küsten
3. Zur Formation partiell stehender Wellen
4. Anhang:
  - 4.1 Bilddokumente zum Messprofil vor der Sturmflut vom 13./14.12.1973
  - 4.2 Bilddokumente zum Messprofil nach der Sturmflut vom 13./14.12.1973
  - 4.3 Spektralfunktionen der Sturmflut vom 13. und 14. 12. 1973
  - 4.4 Bilddokumente zu Wellenmessungen im Winter 1973 an der Westküste von Sylt.
5. Schriftenverzeichnis

## 1. Einführung

Seitdem sich die Küstenforschung vorzugsweise auf die Durchführung von Laboruntersuchungen im Maßstabe 1:1 (Naturmaßstab) in Großforschungseinrichtungen konzentriert, sind bekanntlich die zeitlichen Abläufe *extremer* Seegangs-Ereignisse in der Natur nur noch selten messtechnisch dokumentiert worden. Demnach dürfte sich das Defizit an Kenntnissen bezüglich *extremer* Naturzustände seit den 1970er Jahren kaum ausreichend verringert haben.

Der Verfasser bezieht sich jedenfalls im Folgenden ein weiteres Mal auf die Untersuchung der Sturmtidenfolge vom 13./14. Dezember 1973, deren Wellen- und Strömungsdaten auf Magnetband gespeichert und unter Verwendung fast ausschließlich automatischer Auswertsysteme analysiert worden waren [1].

Bei diesem an der Westküste der Insel Sylt vor Westerland betriebenen Naturmessprogramm bestand das Ziel insbesondere darin, im Rahmen des DFG-Forschungsprojektes „Energieumwandlungen in Brandungszonen“ erstmals unter Verwendung elektronischer Messgeräte *Brandungsdaten während des Ablaufes von Sturmtiden* zu gewinnen, [2].

Speziell handelte es sich bei den Untersuchungen des Verfassers um die Synchronmessung insbesondere der Wasserspiegelauslenkungen an zwei 15m voneinander entfernten Messstationen (100m und 85m vom Randdünenfuß entfernt) in dem auf Abb.1 dargestellten küstennormalen Messprofil, vergl. auch Anhänge 4.1 und 4.2.

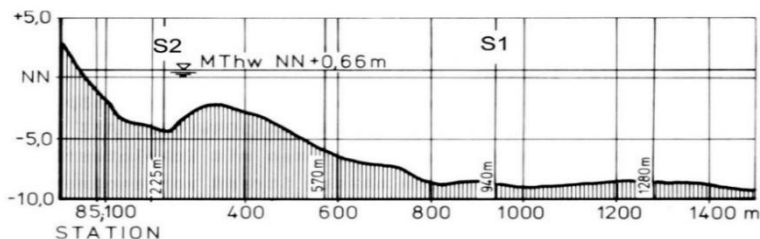


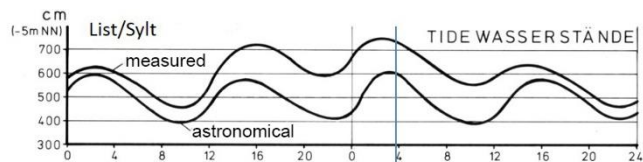
Abb.1: Messprofil Westerland/Sylt, 1973. Messstationen am Strand bei 100m und 85m sowie küstennahe Wellenmessstationen S1, S2. .

In der Vergangenheit waren die betreffenden Daten in verschiedenen Publikationen schwerpunktmäßig unter den nachfolgenden Aspekten behandelt worden:

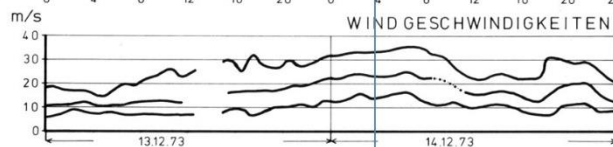
- 1974            Datenanalysetechnik, Wasserstände, Orbitalgeschwindigkeiten, normierte Brandungsspektren [1], [2];
- 1975, 1976    Brandungsspektren, Summenhäufigkeiten der Energiedichte (co-cumulative spectra) [3] [4];
- 1978, 1979    Wellenverformung, anomale Dispersion [5], [6], [7];
- 1980            anomale Dispersion zufolge strömungsbedingter Frequenzverschiebung [8], [9];
- 1982, 1983    Analogie zur Resonanzabsorption elektromagnetischer Wellen [10], [11];
- 1996            Unterschiedliche Effekte anomaler Dispersion [12], [13];
- 2003, 2005    Beckenresonanz, Wellenresonanz [14], [15].

### List/Sylt

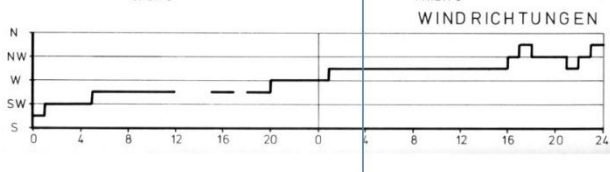
Tide Water Levels



Wind Speeds



Wind Directions



Wave Energy

at stations 100m and 85m  
seaward of the coastline (foot of the dune)  
at Westerland/Sylt.  
December 13-14, 1973

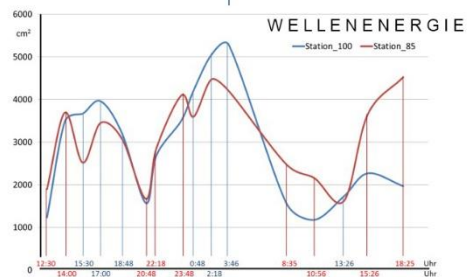


Abb.2: Wasserstände, Windgeschwindigkeiten, Windrichtungen und Wellenenergien während des Ablaufes der Sturmtidenfolge vom 13. auf den 14.12.1973 vor Westerland, Sylt.

Die damaligen Messungen waren durch *hochenergetische Energiedichtespektren* des Brandungsseeganges charakterisiert, vergl. Anhang 4.3, und hatten die Grundlage für die Berechnung von Übertragungsfunktionen (und anderer Spektralfunktionen) beider synchronen Pegelauf-

zeichnungen) gebildet. Als markantes Ergebnis dieser Analysen waren *Spektren der Phasengeschwindigkeiten* [6] erhalten worden, die mit  $dc/df > 0$  ein gänzlich der klassischen Dispersionsrelation widersprechendes *anomalies Dispersionsverhalten* zeigten.

Büsching, F. & Speranski, N. S. hatten diesbezüglich Fehlerbetrachtungen angestellt, in die auch die Naturuntersuchungen anderer Forscher einbezogen waren.

Als Ergebnis konnte die Vertrauenswürdigkeit des nunmehr mit der Abkürzung ADE bezeichneten Effektes der *anormalen Dispersion* bezüglich zweier etwa durch die Peakfrequenz  $f_p$  voneinander getrennter Frequenzbereiche festgestellt werden. Insbesondere wurde der ADE für Frequenzen  $f > f_p$  bezüglich steiler und brechender Wellen als *Effekt zweiter Ordnung* erkannt, während für Frequenzen  $f < f_p$  der ADE auf das Vorhandensein *partiell stehender Wellen* hindeutet [12].

Aufgrund der Tatsache, dass der *niederfrequente* ADE insbesondere aber bei den *extremen* Seegangsverhältnissen auf Sylt besonders stark ausgeprägt war, sah sich der Verfasser veranlasst, erneut die *Analogie* zu der *Resonanzabsorption elektromagnetischer Wellen* [14], [15] zu diskutieren, zumal eine solche bei Beckenschwingungen im *Wellenkanal der FH Bielefeld* nachgewiesen worden war, [14].

Die Analogie wird dabei bekanntlich darin gesehen, dass bei beiden Wellenarten (elektromagnetischen Wellen und Wasserwellen) Frequenzbereiche existieren, in denen die Phänomene *Resonanz*, *Absorption* und *anomale Dispersion* gemeinsam auftreten.

Hatte der Verfasser die Anzeichen eines *Resonanzverhaltens* zusammen mit dem ADE bei Wellen in dem betreffenden Wellenkanal bereits unter Zugrundelegung der Eigenformen des Inhaltes eines Beckens mit *vertikalen* gegenüberliegenden Wänden erkannt [14], konnte die *Resonanzthese* durch weitere *Näherung* an die *wirklichen* Randbedingungen noch erhärtet werden. Die dabei verwendete veränderte Beckenkonfiguration war für relativ steile Uferböschungen als *passend* erkannt worden [16], [17], weil dort bei der *Reflexion* an 1:3 und 1:2 *geneigten Uferböschungen* auch das Auftreten von *Phasensprüngen*  $\Delta\phi$  (= Phasenverschiebungen zwischen einfallenden und reflektierten Wellen) beobachtet worden war, vergl. weiter unten.

Die Bedeutung der bei der Reflexion auftretenden Phasenverschiebung  $\Delta\phi$  – abhängig von Frequenz, Böschungsneigung und Oberflächenstruktur – hatte der Verfasser im Zusammenhang mit der Untersuchung an *Hohldeckwerken* [18] [19] beobachtet, bei denen sich die strömungsverändernden Einwirkungen auf die Waschbewegungen zugunsten eines *geringeren Wellenaufbaus* zugleich auch im Sinne *geringerer Brecherhöhen*, einer *veränderten Brecherform* und der *Lage der brechenden Welle relativ zum Bauwerk* auswirken.

Dementsprechend war er zu einer differenzierteren Sichtweise des Brandungsgeschehens an Uferböschungen gelangt, bei der die bei Reflexion und Dissipation auftretende veränderliche Phasendifferenz  $\Delta\phi$  zwischen der einfallenden und der reflektierten Welle eine wichtige Rolle spielt:

Für die Beschreibung des Brechvorganges der Wellen sind nicht nur die Phänomene der *Reflexion* und der *Dissipation* zu berücksichtigen, sondern auch das der *Transmission*, - analog der Kombination dieser Phänomene von elektromagnetischen Wellen an der Grenzfläche unterschiedlicher Medien.

Im Verlauf des dissipativen Brechvorganges an steilen Uferböschungen entsteht aus der sich mit der Phasengeschwindigkeit  $c_i$  fortbewegenden Ursprungswelle der Wellenhöhe  $H_i$  landseitig als Transmissionswelle ein Wellenauflaufimpuls mit der Höhe  $H_t < H_i$ , der Wellenlänge  $L_t < L_i$  und der Fortschrittsgeschwindigkeit  $c_t < c_i$ . Gleichzeitig formt sich seeseitig eine reflektierte Welle mit der Wellenhöhe  $H_r < H_i$ .

Entscheidend ist dabei, dass die positive Wasserspiegelauslenkung der transmittierten Übertragungswelle offenbar aus Gründen der Impulserhaltung örtlich eine negative Wasserspiegelauslenkung der Reflexionswelle erfordert. Somit kommt es bei der Überlagerung der einfallenden und der reflektierten Wellen an geneigten Uferböschungen zu *partiell stehenden* Wellen mit einem Phasensprung  $\Delta\phi$ , dessen Ausprägung einerseits über die Lage der partiell stehenden Welle am Bauwerk entscheidet und andererseits für die Brecherkinematik zumindest mitbestimmend ist, [16], [18].

Die Motivation für die nachfolgenden Erörterungen ist insbesondere darin zu sehen, vorhandene aufbereitete Messdaten, die zur Definition einer *Sturmwellenresonanz* (SWR) geführt hatten, unter Berücksichtigung der oben dargestellten *neueren Erkenntnisse* neu zu bewerten bzw. zu ergänzen.

## 2. Resonante Beckenschwingungen an natürlichen Küsten

Zum Nachweis der Existenz der “Sturmwellenresonanz an der Westküste der Insel Sylt” in [14] waren lediglich die 5 von 16 Intervallen von Brandungswellenmessungen für die betreffenden Untersuchungen ausgewählt worden, bei denen die *maximalen* Wasserstände innerhalb der Sturmzeitdauer von rd. 30 Stunden aufgetreten waren, vergl. Abb.2. In Anbetracht der äußerst *energiereichen* Spektren lag es nahe, *Mechanismen*, die bisher etwa nur von *langwelligen* Schwingungsanregungen der Wasserkörper von Buchten und Hafenbecken etwa durch Tsunami bekannt sind, auch als ursächlich für *höher frequente* maritime Anregungen zu vermuten.

Von besonderer Bedeutung ist dafür die Erkenntnis, dass es bei der Unterhaltung von Hafenresonanzen *durchaus nicht* der *exakten* Randbedingungen eines einseitig offenen oder geschlossenen *Beckens* mit regelmäßigen vertikalen Berandungen bedarf, und z. B. nach Bascom [20] auch Wassermassen über dem *Kontinentalschelf* zu seiches-artigen Schwingungen angeregt werden können, ohne dass etwa Beckenberandungen erkennbar wären. Kaum verwunderlich ist auch die Tatsache, dass für die Entstehung der höchsten jemals von wissenschaftlichen Geräten aufgezeichneten Wellen in der *Rockall-Rinne* (Rockall Trough westlich von Schottland)

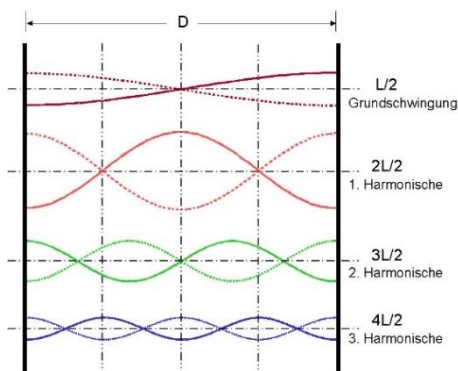


Abb.3: Die ersten 4 theoretischen Eigenformen des Inhaltes eines Beckens mit vertikalen Wänden im Abstand D

noch unbekannte Resonanzmechanismen vermutet werden [21]. Nicht zuletzt wird auch das Auftreten von *Randwellen* (edge waves) von Forschern als Resonanzerscheinung gedeutet, mit der Besonderheit, dass hier meistens von *subharmonischen* küstenparallelen Schwingungen die Rede ist [22].

Tatsächlich hatte dem Verfasser in 2003 zum Nachweis resonanter Zustände von *unterschiedlichsten* Wasserkörpern - wie einerseits des Inhaltes eines *Wellenkanals* oder andererseits des durch das Messprofil der Abb.1 begrenzten Wasserkörpers - als Resonator ein *prismatisches Wasservolumen* (in einem Becken mit vertikalen Wänden, vergl. Abb.3) zunächst als *grobe Näherung* ausgereicht.

Hierfür können bekanntlich die Eigenfrequenzen entsprechend den Eigenformen der Abb.3 für perfekt stehende Wellen unter Verwendung der nach Merian (1828) benannten Formel (1) bestimmt werden.

$$f[\text{Hz}] = (n + 1) \cdot \frac{c}{2 \cdot D} \quad (1)$$

In dieser auf *perfekt stehenden Halbwellen* basierenden Formel sind

D = der maßgebliche horizontale Wandabstand,  
c = die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit und  
n = die Ordnungszahl der Eigenschwingung.

Mit n = 0 ist die Eigenform der Grundfrequenz (fundamental) gekennzeichnet und n = 1, 2, 3...werden als erste, zweite, dritte... Oberschwingung (first, second, third harmonic) bezeichnet.

Im Gegensatz zu Merian, der in seiner Formel die nur von der Wassertiefe d abhängige dispersionslose Schwallgeschwindigkeit (nach Lagrange)  $c = \sqrt{gd}$  verwendet, sind jedoch bei der spektralen Analyse der ggf. nach der Ordnungszahl n(f) aufgelösten Formel hier die von der Frequenz abhängigen quasi gemessenen Phasengeschwindigkeitswerte c(AD)(f) einzusetzen.

Aufgrund der aus Modelluntersuchungen im Maßstab 1:5 gewonnenen Erkenntnis, dass es auch bei Wasserwellen neben der *positiven Totalreflexion* den Fall der *negativen Totalreflexion* als zweiten *theoretischen Grenzfall* gibt [16], waren die Umstände für deren *näherungsweise* Auftreten in der Natur mithilfe der Definition des *komplexen Reflexionskoeffizienten*  $\Gamma = C_r \cdot e^{i\Delta\varphi}$  [18] insofern beschreibbar geworden, dass nunmehr zwischen positiver und negativer partieller Reflexion unterschieden werden kann.

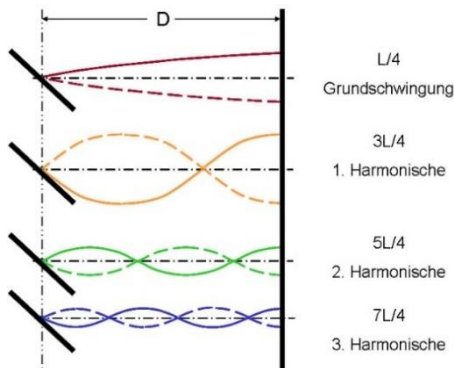


Abb.4: Die ersten 4 theoretischen Eigenformen des Inhaltes eines Beckens mit einer vertikalen und einer geneigten Wand im Abstand D.

Konkret hatten die Wellenkanaluntersuchungen des Verfassers gezeigt, dass an relativ steilen Böschungen in unmittelbarer Nähe derselben eher ein *unvollkommener Schwingungsknoten* (entsprechend einem Energieminimum) als ein *unvollkommener Schwingungsbauch* (entsprechend einem Energiemaximum) auftritt und damit ein vornehmlich von der Böschungsneigung und der Frequenz abhängiger *Phasensprung* verbunden ist.

Dementsprechend können für Beckenkonfigurationen, wie derjenigen eines Wellenkanals, mit der Annahme einer vertikalen Wand (mit positiver Reflexion am Ort des Wellenerzeugers) und einer geneigten Wand (mit negativer Reflexion an der steilen Böschung) an der gegenüberliegenden Seite, die Eigenfrequenzen

besser basierend auf perfekt stehenden ungerad-zahligen Viertelwellen, vergl. Eigenformen der Abb.4, gemäß der nachfolgenden Formel (2) genähert werden (als nach Formel (1)):

$$f[H_z] = (2n + 1) \cdot \frac{c}{4 \cdot D} \quad (2)$$

Die o.a. Formel für die Eigenfrequenzen nach der Ordnungszahl  $n(f)[-]$  aufgelöst, ergibt Formel (3):

$$n(f)[-] = \frac{2 \cdot D \cdot f}{c} - 0,5 \quad (3)$$

Diesbezüglich zeigt Abb. 5 beispielhaft die verbesserten Ergebnisse für Beckenschwingungen des verwendeten Wellenkanals, [16].

Für den betreffenden Fall sei vor allem auf das Auftreten resonanter Oberschwingungen mit Ordnungszahlen  $4 \leq n \leq 9$  hingewiesen, die unter Verwendung der Formel (3) mit dem Wandabstand  $D = 11,638\text{m}$  (Entfernung zwischen dem Lagerpunkt der Wellenklappe und

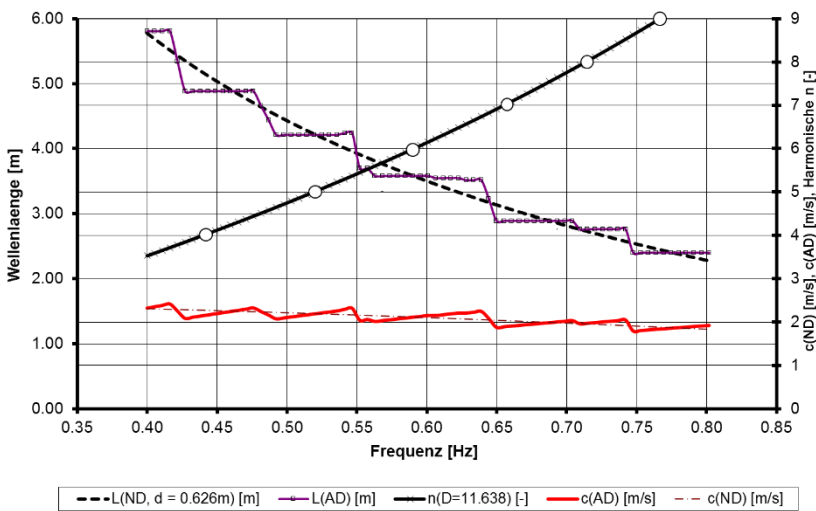


Abb.5: Komponenten-Längen, Phasengeschwindigkeiten und Ordnungszahlen der Beckenschwingungen in Abhängigkeit von der Frequenz.

dem Durchstoßpunkt der Böschungsoberfläche durch den Ruhewasserspiegel (Punkt IP)) erhalten wurden.

Zudem wird deutlich, dass die betreffenden Ordnungszahlen jeweils mit Teilfrequenzbereichen übereinstimmten, die durch *anomale Dispersion*  $dc/df > 0$  und somit durch Resonanz gekennzeichnet sind.

Die ausgemessenen Komponentenlängen  $L(AD)^1(f)$  streben in der Nähe der betreffenden *Resonanzstellen* einem *konstanten* Wert zu, was für die Phasengeschwindigkeiten  $c(AD)(f) = L \cdot f$  offenbar das für anormale Dispersion kennzeichnende Verhalten  $dc/df > 0$  bedeutet. Dies hat die Folge, dass mit zunehmender Entfernung von der Resonanzstelle  $L(AD)(f)$  und  $c(AD)(f)$  von den theoretischen Werten  $L(ND)(f)$  bzw.  $c(ND)(f)$  mit abnehmender Frequenz nach unten und mit zunehmender Frequenz nach oben zunehmend abweichen. Hier ist zu bemerken, dass die Übereinstimmung der berechneten Resonanzfrequenzen mit den Schnittpunkten von  $L(ND)(f)$  und  $L(AD)(f)$  einerseits und  $c(ND)(f)$  und  $c(AD)(f)$  andererseits nur für die *energie-reichsten* Partialwellen mit den Längen 3,58m (für  $n = 5$ ;  $f \approx 0,52\text{Hz}$ ) und 4,21m (für  $n = 6$ ;  $f \approx 0,59\text{Hz}$ ) recht genau übereinstimmen, wie dies auch bei der Resonanzabsorption elektromagnetischer Wellen in Dielektrika der Fall ist [11]. Die zunehmende Abweichung für niedrigere und höhere Resonanzfrequenzen dürfte u.a. in der geringeren Vertrauenswürdigkeit der Spektralanalyse in den betreffenden Frequenzbereichen begründet sein.

Es ist an dieser Stelle klarzustellen, dass die betreffenden Ergebnisse die Zustände beschreiben, wie sie sich aufgrund der tatsächlichen Randbedingungen im Wellenkanal der FH Bielefeld einschließlich etwa nichtquantifizierbarer frequenzabhängiger Dämpfungswirkungen als *negative* Reflexion an der (steilen) Böschung 1:m = 1:3 ergeben haben. Näheres ist den Bezugspublikationen zu entnehmen [14], [15], [16], [17].

Entsprechend der Definition des *komplexen Reflexionskoeffizienten* (CRC)  $\Gamma = C_r e^{i\Delta\phi}$  [18] (mit dem Betrag  $C_r = H_r/H_i$  und der Phasendifferenz  $\Delta\phi$ ) ist hierbei als *negativ* der Reflexionszustand gekennzeichnet, bei dem der Abstand eines unvollkommenen Schwingungsknotens von einer ebenen Böschung (Reflexionspunkt IP) *geringer* ist als der bauwerksnaheste unvollkommene Schwingungsbauch, also für Phasendifferenzen  $90^\circ < \Delta\phi < 270^\circ$ .

An *natürlichen Küsten* dürfte indessen die negative Reflexion bei Sturmsituationen kaum eindrucksvoll in Erscheinung treten. Es sei denn, die örtlichen Randbedingungen (und Spektralfrequenzen) begünstigen tendenziell die Ausbildung der Reflexionsbrecher-Brandung (surging waves).

Werden hingegen bei der Reflexion vom Fuß der Düne bzw. des Kliffs (Sylt) Neigungen  $\geq 30^\circ$  angenommen, ist in der *Natur* fast ausschließlich von *positiver* Reflexion auszugehen. Wie die Auswertungen der erwähnten Wellenkanaluntersuchen zeigen, trifft dies zwar nicht für den dort untersuchten Frequenzbereich  $0,4\text{Hz} \leq f \leq 0,8\text{Hz}$  (bzw. Wellenlängen  $L < 6\text{m}$ ) zu, lässt sich aber beispielweise für Glatdeckwerke 1:3 aus den erhaltenen Ergebnissen für den *Bereich natürlicher Wellenlängen* (mit etwa  $L > 12\text{m}$ ) extrapolieren. [18]. Der Autor zieht daraus den Schluss, dass neben anderen Abhängigkeiten die Ausprägung der einen oder der anderen (positiven oder negativen) Art der Reflexion *hauptsächlich* durch die *Frequenz* bestimmt ist.

Anders ausgedrückt ist der Effekt der *Strukturierung der Oberfläche* eines Reflexionsobjektes demnach bezüglich der Ausprägung der *positiven* Reflexion umso *unwichtiger* je länger die Wellen sind.

---

<sup>1</sup> Der Klammerausdruck (AD) wurde aus früheren Texten beibehalten und bezeichnet auf Messungen zurückgehende Werte (Quasi-Messwerte = aus Messungen einer anderen Größe abgeleitete Werte), die im Wesentlichen anormale Dispersion (mit  $dc/df > 0$  bzw.  $dc/dL < 0$ ) charakterisieren. Dagegen weist der Klammerausdruck (ND) auf theoretische Funktionswerte gemäß Verwendung der klassischen Dispersionsfunktion mit  $dc/df \leq 0$  bzw.  $dc/dL \geq 0$  hin.



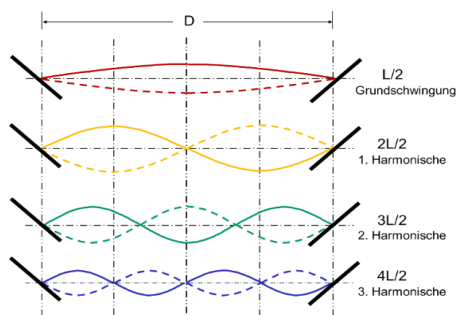


Abb.6: Die ersten 4 theoretischen Eigenformen des Inhaltes eines Beckens, an dessen geneigten Wänden Phasensprünge mit  $\Delta\phi = 180^\circ$  und somit negative Totalreflexionen auftreten.

So war also im Gegensatz zu den Randbedingungen des o.a. Wellenkanals für die morphologischen Randbedingungen des Messprofils Westerland/Sylt 1973, vergl. Abb.1, die Sturmwellenresonanz als *Anpassung der Längen* benachbarter Fourier-Komponenten der betreffenden Resonanzstellen an (imaginäre) Beckenbegrenzungen wohl *berechtigtweise* unter Verwendung der aus der Formel (1) berechenbaren Ordnungszahlen  $n(f)$  der Eigenschwingungen erklärt worden, obwohl die Entfernung Randdüne – Riff nur mit Mühe mit vorgefundenen Wellenlängen in Beziehung gesetzt werden kann.

Das mit der Längenanpassung korrespondierende anomale Verhalten der Phasengeschwindigkeit, wonach der ADE primär die *markante* Abweichung von der ggf. schwach normalen Dispersion in der unmittelbaren Nähe von *ausgezeichneten Resonanzstellen* bedeutet, war indessen bisher nicht hinreichend deutlich geworden:

In [14] (und weiteren vorausgegangenen diesbezüglichen Veröffentlichungen) waren die quasi gemessene *anomale* Dispersionsfunktion  $c(AD)(f)$  und die klassische theoretisch *normale* Dispersionsfunktion  $c(ND)(f)$  vornehmlich *global* bezüglich des gesamten energiereichen Teiles des Energiedichtespektrums vergleichend einander gegenüber gestellt und damit die Existenz der Resonanzen als hinreichend bestätigt angesehen worden.

Zweifel etwa einerseits hinsichtlich der *gemessenen* Phasengeschwindigkeitswerte im Hinblick auf eine etwa *unstete* Kohärenzfunktion oder andererseits hinsichtlich der theoretischen Dispersionsrelation bezüglich der nur *unsicher abzuschätzenden* Wassertiefe hatten bisher keine entscheidende Bedeutung erlangt.

Im Gegensatz dazu sollen hier nunmehr - a priori – gerade die Abweichungen der Messwerte von  $c(AD)(f)$  von der klassischen Dispersionsrelation  $c(ND)(f)$  in unmittelbarer Nähe der Peak-Frequenz  $f_P$  in den Mittelpunkt der Betrachtung gestellt und in den folgenden Abbildungen 7 bis 12 exemplarisch für die Messung 4 (vom 13.12.1973, 17:00 Uhr) wiedergegeben werden.

Tatsächlich stellt sich *insbesondere* im eng begrenzten Frequenzbereich des *langwelligsten* Hauptpeaks ( $f_P \approx 0,09\text{Hz}$ ) die anomale Dispersion  $dc/df > 0$  – verbunden mit hohen Kohärenzwerten – am stärksten heraus und ist auch für die 2. Harmonische ( $f_{P2} \approx 0,18\text{Hz}$ ) noch eindrucksvoll mit ebenfalls hohen Kohärenzwerten.

Wird die Sturmwellenresonanz - wie in [14] und [15] - vornehmlich bezüglich der Konfiguration eines Beckens zwischen Riff und Strand betrachtet (vergl. Abb.1), dürfte - obwohl es sich beim Riff im Gegensatz zur Randdüne um eine *überströmte* Böschungsstruktur handelt - trotzdem die Annahme *positiver Reflexion* eher berechtigt sein, weil signifikante *Sturmflutwellen* Längen mit  $L > 40\text{m} \gg 12\text{m}$  aufweisen, vergl. [14].

(Nebenbei sei angemerkt: auch für *hinreichend kurze* Wellen in einem Becken mit beidseitig derart geneigten Wänden, dass an ihnen negative Reflexionen mit  $90^\circ < \Delta\phi < 270^\circ$  zu erwarten sind, wäre indessen in Annäherung an Abb.6 *dieselbe* Eigenschwingungsformel (1) wie für Abb.3 anwendbar.)

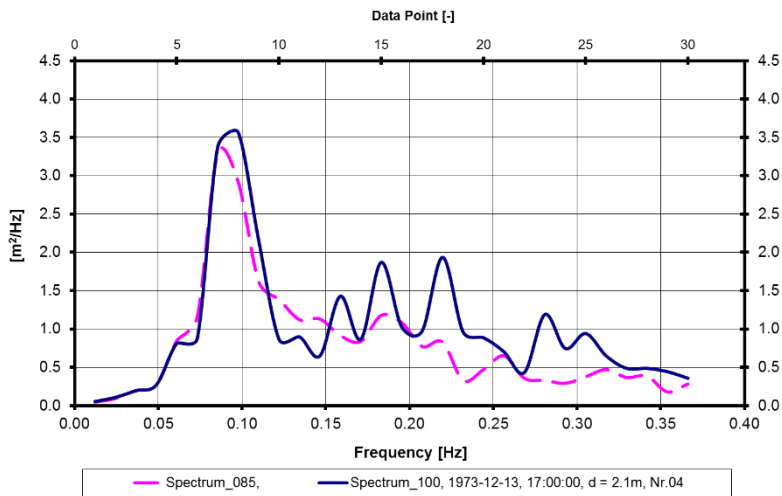


Abb. 7: Energiedichte-Spektren von Sturmwellen der Messung Nr. 4 an den Stationen 100m und 85m im Messprofil der Abb.1. Langwelligster Peak etwa bei  $f_p = 0,09$  Hz.

Wie oben aus Abb. 5 für die Wellenkanal-Untersuchungen ersichtlich, wird auch bei der Betrachtung dieser *hochenergetischen* Naturmessungen vorausgesetzt, dass die gemessenen Werte  $c(AD)(f)$  oder deren (ggf. optimale) Ausgleichsfunktion zumindest für die Resonanzfrequenz  $f = f_p$  des Hauptpeaks annähernd mit  $c(ND)(f)$  übereinstimmen.

Wird für *die so spezifizierten Bedingungen* die klassische Dispersionsrelation  $c(ND)(f)$  ermittelt, stellt sich die hierfür *zutreffende* Wassertiefe als wesentlich geringer heraus als diejenige in [14] bzw. [15] für die Darstellung der betreffenden Vergleichsfunktion gewählte, nämlich  $2,1 < 3,7\text{m}$ .<sup>2</sup>

Während sich hierfür in den Abbildungen 8 und 9 das anomale Dispersionsverhalten in der Abweichung der Phasengeschwindigkeiten  $c(AD)(f)$  von den theoretischen Werten  $c(ND)(f)$

<sup>2</sup> Die *Problematik* der vertrauenswürdigen Angabe von örtlichen Wassertiefen wird durch den Vergleich der Bilddokumente der Anhänge 4.1 und 4.2 deutlich. Dementsprechend waren in Anbetracht der während des Ablaufes der Sturmtiden erfolgten immensen Ausräumungen des Messprofils die *Wassertiefen* in [14] bzw. [15] in Abweichung von den in [1] tatsächlichen mit einem Drucksensor (wesentlich kleiner) gemessenen zu groß abgeschätzt in die Datenanalyse übernommen worden, wenn dies auch ohne wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis geblieben war. Wird jedoch das Phänomen der anomalen Dispersion strikt in der oben präzisierten Weise als *Abweichung von der theoretisch normalen Dispersionsfunktion in unmittelbarer Nähe der Resonanzfrequenz* gesehen, ergibt sich die entsprechende Wassertiefenkorrektur zwangsläufig dadurch, dass die passende theoretische Dispersionsfunktion nur durch Berücksichtigung der *richtigen* Wassertiefe gefunden wird. Wird letztere für die Resonanzstelle des Hauptpeaks ermittelt, trifft diese nach den vorliegenden Messungen für die Resonanzstellen der *höheren* Harmonischen *nur angenähert* zu. Demnach wäre in diesem Sinne von einer strikten Gültigkeit der klassischen Dispersionsrelation *nicht* auszugehen.

mit zunehmender Entfernung von der Resonanzstelle für niedrigere Frequenzen nach unten und für höhere Frequenzen nach oben zeigt, streben auch die Komponentenlängen  $L(AD)(f)$  in der Nähe der betreffenden Resonanzstelle ( $f_P \approx 0,09\text{Hz}$ ) (1. Harmonische) eher einem konstanten Wert zu, wenn auch nicht so deutlich wie in Abb.5. Die Vertrauenswürdigkeit der betreffenden Daten wird dabei durch den hohen Wert der Kohärenz  $\bar{\gamma}_{12}^2(f) > 0,9$  belegt.

Zur weiteren Verdeutlichung sind in Abb. 10 und 11 die Linienspektren der Energiedichte bezüglich der Messstationen 100m und 85m aufgetragen. Solche auf die Wellenlänge bezogenen Werte stellen die *aufsummierten Energiedichten* annähernd gleichlanger Fourier-Komponenten dar. Für die Messstation 100m beträgt die maximale Energiedichte  $\max ED(L) \approx 10\text{m}^2/\text{Hz}$  und dieser ist etwa eine Wellenlänge  $L(AD) = 47,6\text{m}$  ( $\approx 50\text{m}$ ) zugeordnet. Im Gegensatz dazu ist im Frequenzspektrum etwa ein Wert von  $\max E_P(f) \approx 3,6\text{m}^2/\text{Hz}$  vorhanden, für den bei normaler Dispersion unter Berücksichtigung einer Wassertiefe von 2,1m ( $< 3,7\text{m}$ .) nunmehr auch etwa die gleiche zugehörige Wellenlänge von  $L_P(ND) \approx 50\text{m}$  (Resonanz-Wellenlänge) berechnet wird, vergl. Abb. 10.

Abb. 11 enthält zusätzlich die auf die Wellenlänge transformierten Geschwindigkeitsspektren der Abb. 8, von denen im Spektrum  $c(AD)(L)$  die Resonanz markant durch einen Sprung (mit  $dc/dL \rightarrow \pm \infty$ ) in Erscheinung tritt.

Für fehlende Erläuterungen wird auf die Bezugsarbeit [14] verwiesen:

Die den Abbildungen 7 bis 11 entsprechenden, *dort* in Anlage 1a für Messung 4 enthaltenen 5 Abbildungen können aber auch als *annähernd zutreffend* für die etwa als resonante *Zweite Harmonische* deutbare Frequenz gewertet werden, da bei ebenfalls hoher Kohärenz (0,7) der Schnittpunkt von  $c(AD)$  und  $c(ND)$  für die Wassertiefe  $d = 3,7\text{m}$  ( $> 2,1\text{m}$ ) nahe der Resonanzfrequenz  $f \approx 0,18\text{Hz}$  bzw. der zugehörigen Wellenlänge von etwa 32,7m liegt. Der Umstand, dass die Annäherung von  $c(AD)$  an  $c(ND)$  für die Resonanzstelle der zweiten Harmonischen quasi eine größere Wassertiefe erfordert als für die Resonanzstelle der ersten Harmonischen, unterstützt die Vermutung, dass die klassische Dispersionsrelation als Vergleichsfunktion für natürliche hochenergetische 3-dimensionale Seegangsverhältnisse weniger geeignet ist als für die eher 2-dimensionalen Randbedingungen bei Wellenkanaluntersuchungen.

Wie in Kapitel 3 für die Messungen 9, 10 und 11 noch deutlich werden wird, kann eine Erklärung für das *globale anomale* Verhalten der Phasengeschwindigkeit  $c(AD)(f)$  etwa im Bereich  $0,06 \leq f \leq 0,19\text{Hz}$  (vergl. Abb. 8) auch darin gesucht werden, dass *hochenergetische* Energiedichte-Spektren die Peaks *mehrerer* Wellensysteme mit relativ eng benachbarten Resonanzstellen enthalten können, vergl. auch Bild 9 im Anhang 4.4.

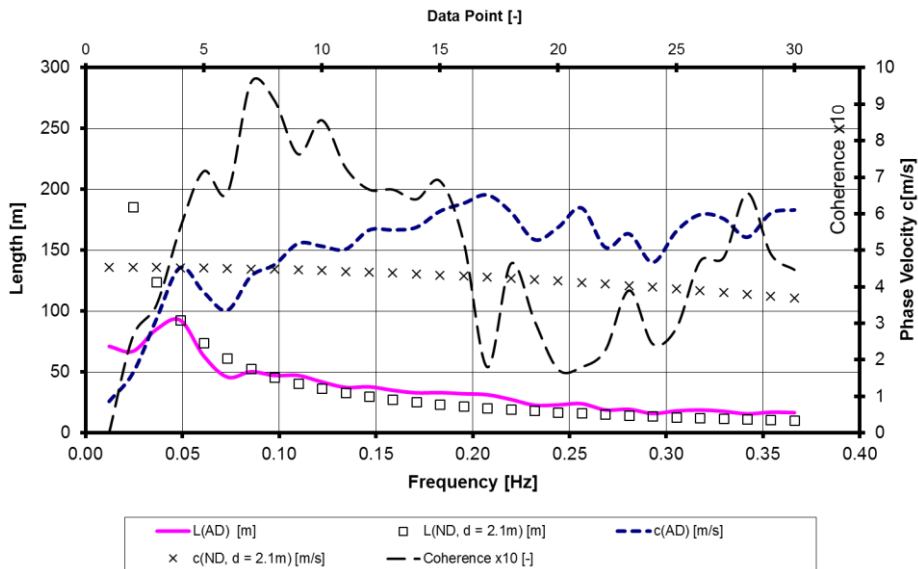


Abb.8: Spektren der Phasengeschwindigkeit  $c(f)$ , der Längen der Wellenkomponenten  $L(f)$  und der Kohärenz  $\gamma_{xy}^2(f)$ .

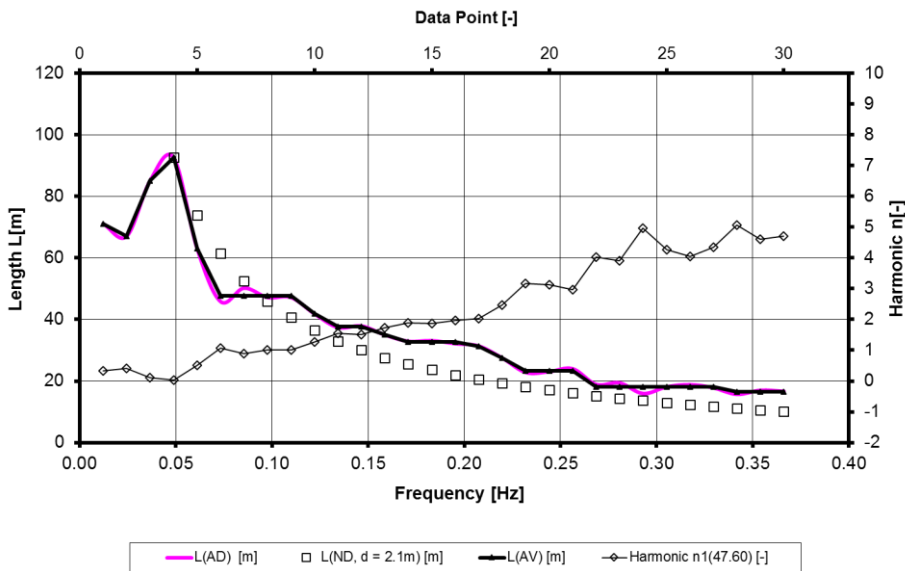


Abb. 9: Vergrößert dargestelltes Spektrum der Längen  $L(f)$  sowie Ordnungszahlen  $n(f)$  der Beckenschwingungen.

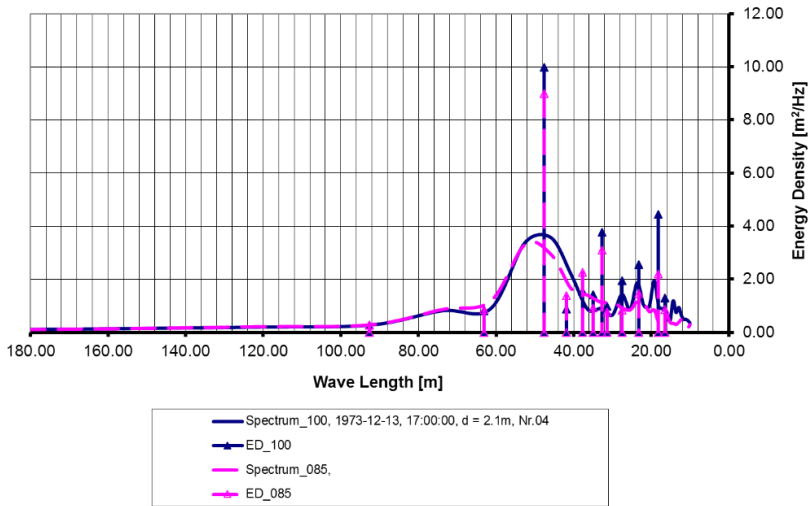


Abb. 10: Unter Verwendung der klassischen Dispersionsrelation auf die Längenachse transformierte Energiedichte-Spektren sowie Linienspektren der Energiedichte  $ED(L)$ , berechnet auf der Grundlage des anomalen Längenspektrums  $L(AD)(f)$ .

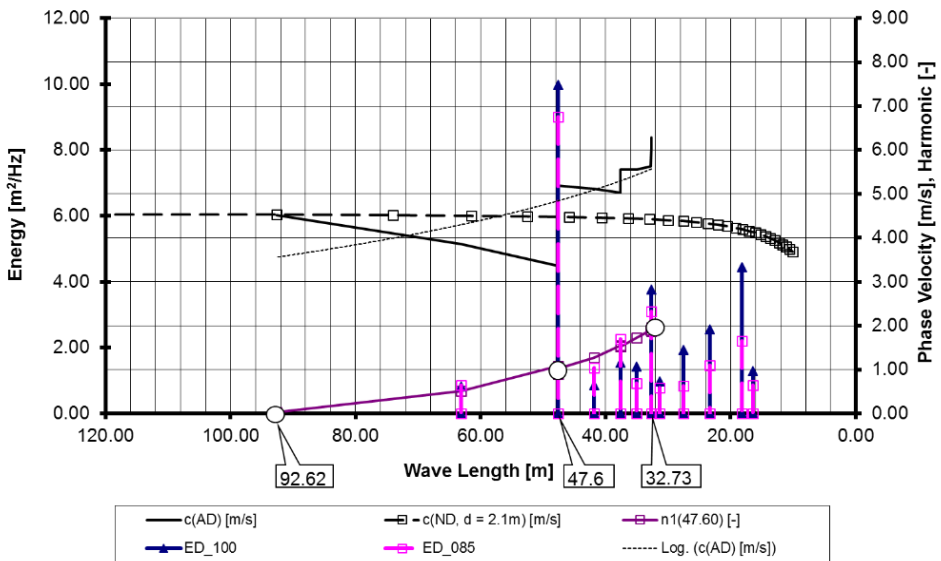


Abb.11: Phasengeschwindigkeiten  $c(ND)(L)$  und  $c(AD)(L)$ , Ordnungszahlen  $n(L)$  der Beckenschwingungen sowie Linienspektren der Energiedichte  $ED(L)$ .

### 3. Zur Formation partiell stehender Wellen

Während die negativen Folgen der *Wellenreflexion* von der historischen fast senkrechten Ufermauer von Westerland/Sylt als allgemein bekannt gelten können, sind dem Autor keine Arbeiten bekannt, in denen speziell die *Reflexion* von der Randdüne oder vom Kliff zwischen Wenningstedt und Kampen behandelt worden ist.

Grundsätzlich dürfte aber noch immer die Tendenz vorherrschen, den *Effekt der Reflexion* an natürlichen Küsten mit *vorgelagerten Sandstränden* gegenüber anderen *Brandungseffekten* zu unterschätzen, zumal dieser nur an *steilen Formationen* und bei *erhöhten Wasserständen* Dominanz erlangen kann.

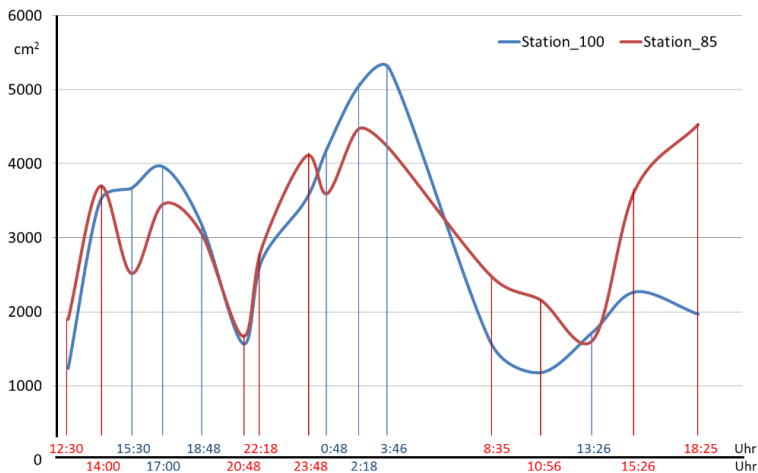


Abb. 12: Spektrale Energie  $E = \sigma^2$  [cm<sup>2</sup>] im untersuchten Frequenzbereich über der Dauer der Sturmtidenfolge am 13. und 14.12.1973 (16 Messintervalle) bezüglich der Messstationen 100m und 85m [4].

Indizien für das Vorhandensein *partiell stehender Wellen* beträchtlicher Intensität, die schließlich die Voraussetzung resonanter Zustände darstellen, werden nachfolgend aus der Gesamtentwicklung der Sturmtidenfolge abgeleitet. Dazu enthält Abb.12 die Auftragung der im Anhang 4.3 als Zahlenwerte enthaltenen Summenhäufigkeiten der spektralen Wellenenergie  $E = \sigma^2$  [cm<sup>2</sup>] (Varianz; kumulierte Wellenenergie) im insgesamt untersuchten Frequenzbereich  $0 \leq f \leq 3,125\text{Hz}$  bezüglich der Messpositionen 100m und 85m vom Dünenfuß über die gesamte Dauer der Sturmtidenfolge.

Eine derartige Auftragung war bereits 1975 eingehend u.a. bezüglich der Energieverteilung in Abhängigkeit von der Frequenz analysiert worden, [4].

(Zur Herausstellung der *Besonderheit der verwendeten Sturmflutaufzeichnungen* (mit Energiedichten bis  $\max E_D = 4,38 \text{ m}^2/\text{Hz}$  und Gesamtenergien  $\max E = \max \sigma^2 \approx 5300 \text{ cm}^2$ ) gegenüber Seegangsverhältnissen mit schwächerer Wellenintensität sei darauf hingewiesen, dass in der genannten Arbeit auch Messungen behandelt wurden, die die Phase abnehmender Wellenintensität mit lediglich  $E = \sigma^2 \approx 1100 \text{ cm}^2$  bei Beaufort 6 und  $E = \sigma^2 \approx 650 \text{ cm}^2$  bei Beaufort 3 repräsentieren.)

Aktuell soll jedoch speziell die in Abb.12 dargestellte zeitweilige Erscheinung einer *höheren* Wellenenergie küstenwärts der (und in der) Brecherzone (an Station 85m) als unmittelbar seewärts der Brecherzone (an Station 100m) erneut und zwar diesmal insbesondere unter dem *Gesichtspunkt der Reflexion* betrachtet werden. In Ermangelung anderer Erklärungen waren seinerzeit für Letztere allein *Refraktionseffekte* als mögliche Ursache für eine zeitweilige etwa auf Station 85m fokussierte Kreuzbrandung angegeben worden.

Aus den der Abb.12 zugrundeliegenden Summenhäufigkeiten der Energiedichte (co-cumulative spectra) bezüglich des insgesamt untersuchten Frequenzbereiches  $0 \leq f \leq 3,125\text{Hz}$  waren für die 16 Messintervalle in [4] außer der Feststellung, dass sich die *Energie brechender Wellen* über ein *weiteres Frequenzband* verteilt, nicht hinreichend befriedigende Aussagen bezüglich der *Stabilität* der Wellen an den betreffenden Messpositionen gemacht worden. Hier sollen jetzt auf der Grundlage der Abbildungen 13 bis 16 Kriterien etwa für unterschiedlich instabile Wellen aus dem *Maß des Gradienten*  $dE/df > 0$  abgeleitet werden. Während zur spektralen Darstellung der sich aufsteilenden und schließlich *brechenden* Wellen zunehmend höhere Frequenzen benötigt werden, dürften für *ausbrandende* Wellen noch höhere Frequenzen erforderlich sein.

Die Abbildungen 13 und 14 enthalten für beide Messstationen die Auftragungen der Varianz

$$E = \sigma_{\eta}^2 = \int_0^{f_i} G_{\eta\eta}(f) df$$

als Maß der Wellenenergie für jeweils  $i = 6$  Frequenzbereiche  $0 \leq f \leq f_i$ , wobei als Grenzfrequenzen  $f_1 = 0,05\text{Hz}$ ,  $f_2 = 0,12\text{Hz}$ ,  $f_3 = 0,2\text{Hz}$ ,  $f_4 = 0,37\text{Hz}$ ,  $f_5 = 1,0\text{Hz}$  und  $f_6 = 3,125\text{Hz}$  verwendet worden sind.

Hier wird ergänzend zu den Ausführungen der Bezugsarbeiten [3] und [4] insbesondere zur *Verteilung des hochfrequenten Energieanteils* zunächst mit Bezug auf die *Wellenstabilität* Stellung genommen.

Offenbar machen sich Phänomene des Wellenbrechens etwa bereits beginnend unterhalb von 0,3Hz bemerkbar und entwickeln Energiedichten bis weit in den Bereich über 1 Hz hinaus,

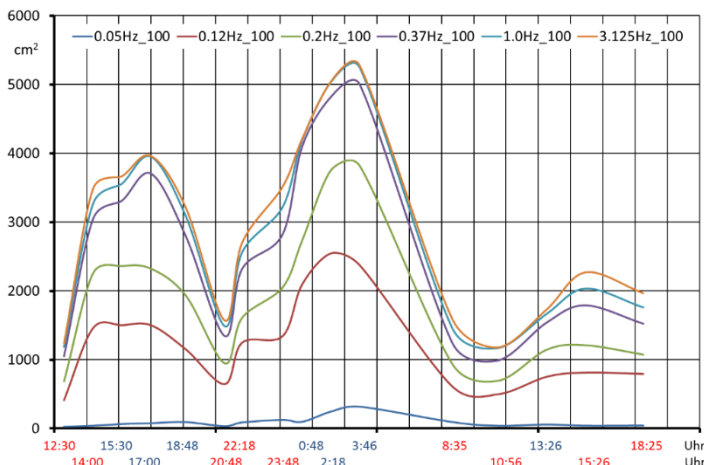


Abb.13: Verteilung der an Station 100m gemessenen Wellenenergie  $E = \sigma_{\eta}^2 = \int_0^{f_i} G_{\eta\eta}(f) df$  auf  $i = 6$  Teilfrequenzbereiche am 13/14.12.1973.

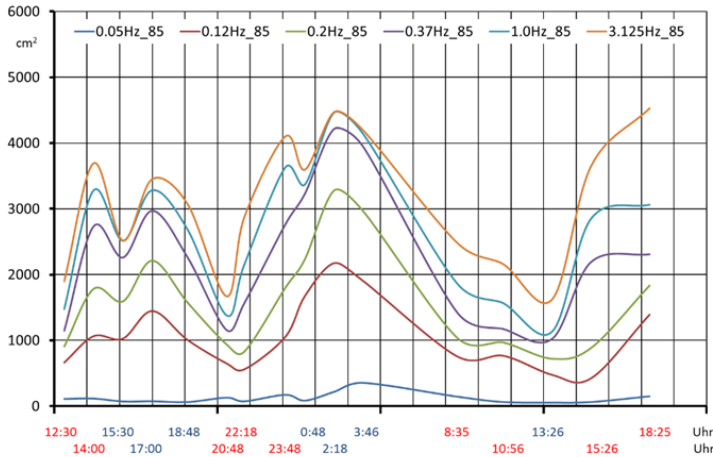


Abb.14: Verteilung der an Station 85m gemessenen Wellenenergie  
 $E = \sigma_{\eta}^2 = \int_0^{f_i} G_{\eta\eta}(f) df$  auf  $i = 6$  Teilfrequenzbereiche am 13/14.12.1973.

vergl. hierzu auch die Anlagen 1 - 16 in Anhang 4.3. Es dürfte aber als sicher gelten, dass *welleninduzierte Energiedichten* nicht bis an die der Spektralberechnung zugrunde gelegten Maximalfrequenz  $f_{\max} = 3,125\text{Hz}$  heranreichen.

Da die *kompletten* analogen Rohdaten der Messungen leider vernichtet worden sind, konnte die wirkliche obere Grenzfrequenz  $f < f_{\max}$  für welleninduzierte Energiedichten jedoch nicht mehr ermittelt werden. Auch zur Art des Wellenbrechens sind weiterhin nur Vermutungen möglich, da auf der Grundlage der zur Verfügung stehenden Messdaten keine Aussagen über die Lage der partiell stehenden Wellen relativ zum effektiven Reflexionspunkt bzw. zur Phase des komplexen Reflexionskoeffizienten  $\Gamma$  (CRC) [18] gemacht werden können.

Bemerkenswert ist jedoch insbesondere die Untersuchung der Energieanteile im Teilbereich der höchsten Frequenzen  $1,0 \leq f \leq 3,125\text{Hz}$ .

Während *beachtliche Zuwächse* der Energie in diesem „Höchstfrequenzbereich“ an Messstation 85 noch *fast immer* (zu 14 von 16 Messzeiten (Messintervallen)), also außer zu den Zeiten 15:30 und 2:18 Uhr) zu verzeichnen sind, ist dies an Messstation 100m *nur* in den Zeitabschnitten 14.00 – 15:30, 22:18 – 23:48 und 15:26 – 18:25 etwa in Übereinstimmung mit den *geringsten* Tidewasserständen der Fall.

Umgekehrt tritt an Messposition 85m in diesem Frequenzband *nur* zu den höchsten Tidewasserständen *kein nennenswerter* Energiezuwuchs mehr auf, was wiederum an Messposition 100m (abgesehen von den genannten Ausnahmen) den *Regelfall* darstellt.

Aus diesem Sachverhalt kann somit der Schluss gezogen werden, dass Energieverlagerungen *in diesen* Frequenzbereich bei relativ hohen Wasserständen nur partiellen Welleninstabilitäten etwa in Form des *Schaumkronenbrechens* (*white capping*) zugeordnet werden können.

*Intensives Wellenbrechen* ist jedoch gekennzeichnet durch hohe Gradienten  $dE/df$  in den nach unten anschließenden Teilfrequenzbereichen.

Die beispielsweise in Abb.15 für Station 85m wiedergegebene Messung 8 zeigt, dass sich das Wellenbrechen zumindest durch Energiedichten im Frequenzband oberhalb von 0,3Hz



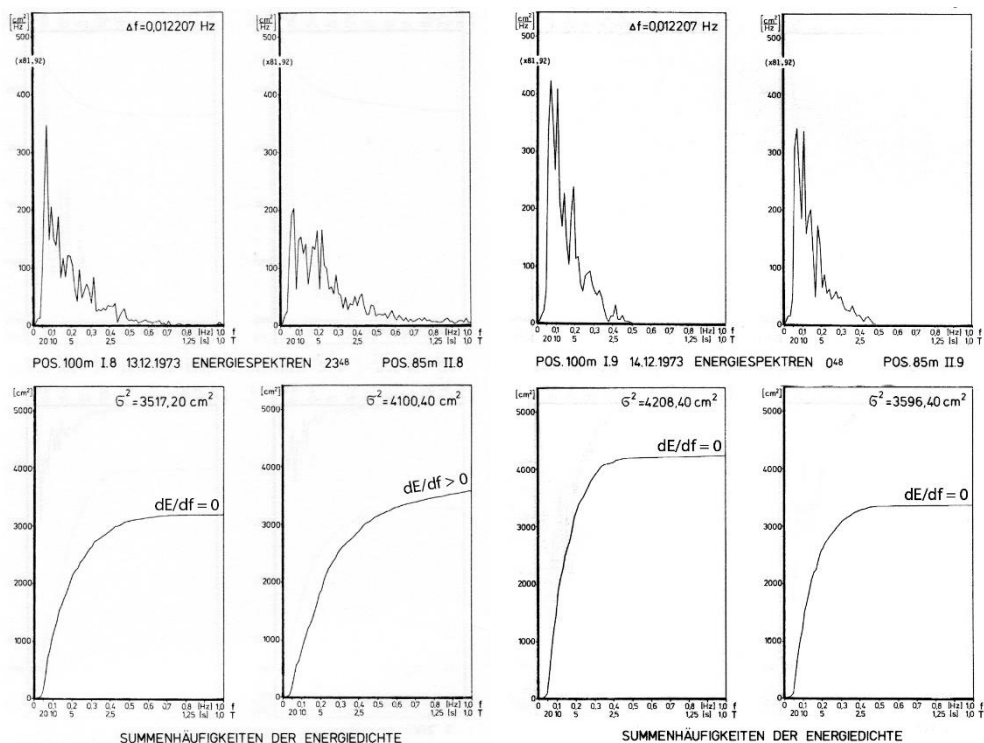


Abb.15: Energiedichtespektren und kumulierte Energie am 13.12., 23:48 für Frequenzen  $0 \leq f \leq 1,0\text{Hz}$  (Messung 8). Energie *brechender partiell stehender* Wellen an Station 85m *größer* als an Station 100m.

Abb.16: Energiedichtespektren und kumulierte Energie am 14.12., 00:48 für Frequenzen  $0 \leq f \leq 1,0\text{Hz}$  (Messung 9). Energie *nichtbrechender partiell stehender* Wellen *größer* an Station 100m als an Station 85m.

bemerkbar macht und noch bei  $f = 1,0\text{Hz}$  deutlich einen *Gradienten*  $dE_{85}/df > 0$  aufweist. Demgegenüber ist für letztere Frequenz ein nennenswerter Zuwachs bei Station 100m kaum erkennbar und tritt auch bei der nächst folgenden Messung 9 ab 00:48 Uhr, vergl. Abb.16, bei höheren Wasserständen weder an der Station 100m noch an der Station 85m auf.

Die durch die Daten der Abb.15 charakterisierten Seegangsverhältnisse beschreiben stabile Wellen an Messposition 100m, während es sich an Station 85m um brechende oder bereits gebrochene Wellen handelt. Besonders bemerkenswert ist jedoch die Tatsache, dass die kumulierte Wellenenergie bezüglich der Frequenz 1Hz an der Station 85m größer ist als an Station 100m und dass sich dieser Sachverhalt bei 9 von den insgesamt 16 Messungen wiederholt, vergl. Anhang 4.3.

Dies lässt darauf schließen, dass *auch* bei den restlichen 7 Messungen quasi *stabiler* Wellen (bei relativ hohen Wasserständen, vergl. Abb.16) nicht notwendigerweise die Energie etwa nur aus Reibungsgründen an Station 85m geringer gemessen wurde als an Station 100m, sondern vielmehr *energiereiche partiell stehende* Wellen im Messprofil gerade so positioniert sind, dass ihre Maximalauslenkungen (Schwingungsbäuche) näher bei Station 100m liegen bzw. ihre Minimalauslenkungen (Schwingungsknoten) näher bei Station 85m.

Umgekehrt ist mit Bezug auf Abb. 15 auch *plausibel*, dass kleinere, ungebrochene Wasserspiegelauslenkungen (Wspa) partiell stehender Wellen an Station 100m *in der Nähe eines Schwingungsknotens* gemessen worden sind, während es an Station 85m einerseits wegen der *geringeren Wassertiefe* (als bei Station 100m) und andererseits wegen der *größeren Wasserspiegelauslenkungen* in der Nähe des Schwingungsbauches zum Wellenbrechen kommt.

Zur Demonstration des beschriebenen Reflexionsgeschehens wird nachfolgend wiederum exemplarisch nur auf die Messungen mit *maximalen Wasserständen* Bezug genommen, die bereits die Grundlage für die Analyse der *Sturmwellenresonanz* [14] gebildet hatten. Es handelt sich dabei jeweils um 3 Messungen am 13.12.1973 ab 15:30 Uhr bzw. am 14.12.1973 ab 0:48 Uhr. Diese zeichnen sich durch stabile<sup>3</sup>, nichtbrechende Wellen an *beiden* Messstationen aus, sodass die aus Abb.12 ersichtliche *Abnahme der Wellenenergie* von Station 100m nach Station 85m weitestgehend dem jeweiligen *Phasenunterschied* der partiell stehenden Wellen an den beiden 15m voneinander entfernten Messstationen zuzurechnen ist.

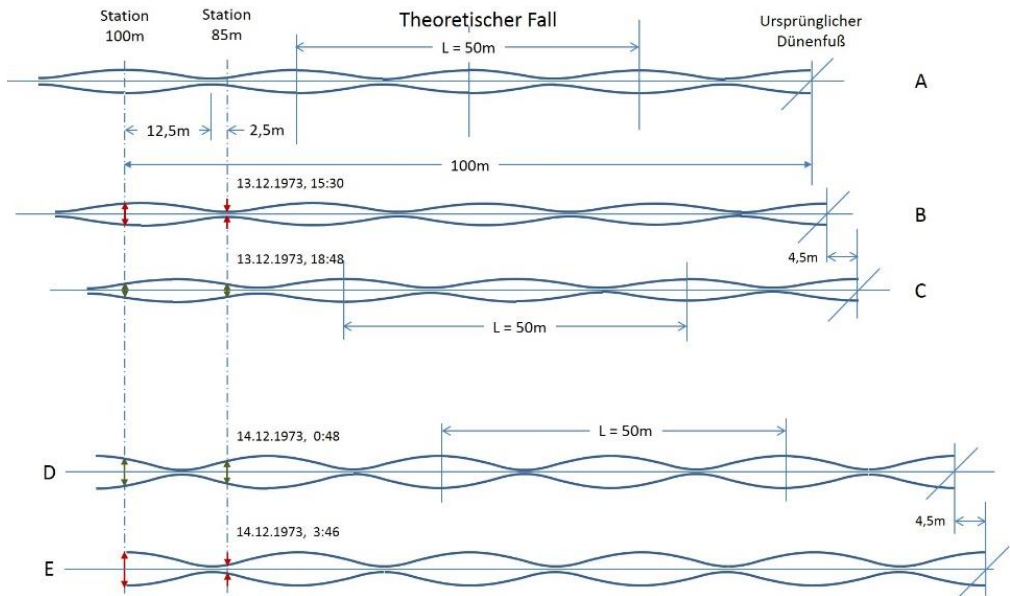


Abb.17: A. Theoretische Ausgangssituation: Partiiell stehende Welle der Länge 50m am Dünenfuß.

B: Rote Pfeile: große Wasserspiegelauslenkungen an Station 100m, kleine Wspa an Station 85m.

C: Grüne Pfeile: *geringe Unterschiede kleinerer Wspa* an Station 100m und 85m.

D: Grüne Pfeile, *geringe Unterschiede größerer Wspa* an Station 100m und 85m.

E: Rote Pfeile: große Wasserspiegelauslenkungen an Station 100m, kleine Wspa an Station 85m.

<sup>3</sup> Wasserspiegelauslenkungen einer übersteilen, aufgerissenen Clapotis sollten wegen der ausreichenden Abweichung der Neigungen der Reflexionsflächen von der Vertikalen (entsprechend positiver Reflexion mit Phasenwinkeln  $\Delta\varphi \neq 0^\circ$ ) sowohl an der Düne als auch am Riff selten sein, wenn das Auftreten von Brechern *auch* entgegen der Wellenfortschrittsrichtung vorkommen kann.

Für die genannten Messungen hatten die Analysen in [14] resonante Wellenlängen zwischen 40 und 60m ergeben. Dementsprechend wird für Abb.17 exemplarisch als Mittelwert die Wellenlänge  $L = 50\text{m}$  zugrunde gelegt, die den Analyse-Ergebnissen der Messungen 4 am 13.12.1973, 17:00 Uhr recht nahe kommt, vergl. Abbildungen 7 – 11.

Da den hier behandelten Messungen in den Monaten November und Dezember 1973 bereits 3 Sturmtiden-Ereignisse vorausgegangen waren, kann ein direkter Bezug zum Koordinatenursprung am ehemaligen Dünenfuß, vergl. Abb.1 nicht mehr zweifelsfrei hergestellt werden, zumal der Abtrag von der Düne bereits zu einer Verlagerung des Dünenfußes um etliche Meter geführt hatte und demzufolge Aussagen über den Reflexionspunkt an der Düne nicht möglich sind.

Wird jedoch der dargestellten hypothetischen *Ausgangskonfiguration* eine partiell stehende Welle der Länge 50m zugeordnet, könnte sich tatsächlich ein unvollkommener Schwingungsbauch eher in der Nähe von Station 100m befunden haben und ein unvollkommener Schwingungsknoten in der Nähe von Station 85m, vergl. Fall A in Abb.17.

Außer der bereits oben erfolgten Feststellung *positiver Reflexion* an der Düne (mit  $-90^\circ < \Delta\varphi < +90^\circ$ ) dürfte jedoch jede weitere Aussage zur (genaueren) Lage der partiell stehenden Welle *spekulativ* sein, da

- die genaue *Lage des Reflexionspunktes* an der Düne unbekannt ist (Messprofil-Null ungleich aktuellem Dünenfuß),
- die *horizontale Wellenasymmetrie* und die *Wellenstauchung* mit Annäherung an den Reflexionspunkt zunehmen, vergl. [18] [19] und
- die *spektrale Peakposition* infolge insbesondere überlagerter *beschleunigter Strömungen* verändert ist.

Wird jedoch die Phasendifferenz bezüglich der Messstationen 100m und 85m als *einzige* Ursache zugrunde gelegt, könnte immerhin am 13.12.1993 die in der Zeit von 15.30 bis 18.48 Uhr *abnehmende* Differenz um  $\Delta E \approx 1020\text{cm}^2$  ( $= (3668,4 - 2518,2) - (3204,0 - 3074,4)$ ) auf eine küstenwärtige Verlagerung der partiellen Clapotis der Länge 50m um etwa 4 bis 5m hinweisen, vergl. die relativen Clapotis-Lagen B und C.

Ähnliches gilt für die *zunehmende* Differenz um  $\Delta E \approx 468\text{cm}^2$  ( $= (5277,6 - 4197,6) - (4208,4 - 3596,4)$ ) am 14.12. in der Zeit von 0.48 bis 3.46 Uhr mit ebenfalls 4 bis 5m, vergl. die relativen Clapotis-Lagen D und E.

Verlagerungen einer partiellen Clapotis in der ermittelten Größenordnung innerhalb von etwa 3 Stunden, i.e. ca.  $1,5\text{m}/h$ , dürften infolge Dünenabbruchs während einer schweren Sturmflut zu den *Tidehochwasserzeiten* mit Energiewerten um  $E = \sigma^2 \approx 4000\text{cm}^2$  (und auch wesentlich mehr, vergl. Abb.2) durchaus realistisch sein und passen somit auch zu einem durch *Reflexion* und *Resonanz* geprägten Brandungs-Szenario.

Abschließend wird nochmals auf die *stark veränderliche Verteilung der Energiedichte* der den beiden Messstationen zuzuordnenden *Energiedichtespektren* eingegangen. Auch hierbei erfolgt eine Beschränkung auf diejenigen, die während der Tidehochwasserperioden *nichtbrechende Wellen* repräsentieren, sodass Energiedichteunterschiede an den Stationen 100m und 85m wiederum hauptsächlich *aus den unterschiedlichen Phasenunterschieden* der partiell stehenden Wellen bezüglich der beiden Messpositionen und *nicht aus Brandungseffekten* resultieren sollten.

Die Betrachtung des über dem Strand und seewärts davon vorhandenen Wasservolumens *als Inhalt eines Beckens*, das zu resonanten Schwingungen angeregt wird, ist von besondere Bedeutung, weil dessen *maximale* Auslenkungen nur an den Orten der (*unvollkommenen*) *Wellenbäuche* auftreten können. Somit ist klar, dass *nicht nur* wegen der *nicht kontinuierlichen* Messungen *nicht die maximal* aufgetretenen Seegangs-Energien erfasst sein dürften.

Im Gegensatz zu den Messungen 3, 4 und 5 am 13.12.1973 zu Sturmidehochwasserzeiten mit jeweils *einem* dominanten Peak im Frequenzbereich  $0,073 \leq f_1 \leq 0,11\text{Hz}$  (Abb.7-11) sind am 14.12.1973 zu Zeiten noch höheren Sturmidehochwassers aus der Aufeinanderfolge der Messungen 9, 10 und 11 (vergl. Anlage 4.3) zumindest 2 *dominante* Wellensysteme mit *unterschiedlichen* Harmonischen gleichzeitig erkennbar, deren Ausprägung offenbar auf den extremen Tidewasserstand zurückzuführen ist.

In [14] war bei den Messungen 9 (ab 0:48) und 11 (ab 3:46) mit etwa *bimodalen* Energiedichte-Spektren aus der Gestalt der Funktion  $c(AD)(f)$  im Bereich hoher Energiedichten das Vorhandensein von separaten Resonanzstellen für Harmonische 0 bis 3 für zwei Wellensysteme abgeleitet worden.

Hier wird zudem mit den Abbildungen 18 bis 20 *exemplarisch* die bei korrigiertem höchstem Wasserstand  $d \approx 2,7\text{m} < 4,6\text{m}$  aufgezeichnete Messung 10 (ab 2:18 mit den *maximal gemessenen* Energiedichten) basierend auf einem breiten *unimodalen* Energiespektren näher untersucht.

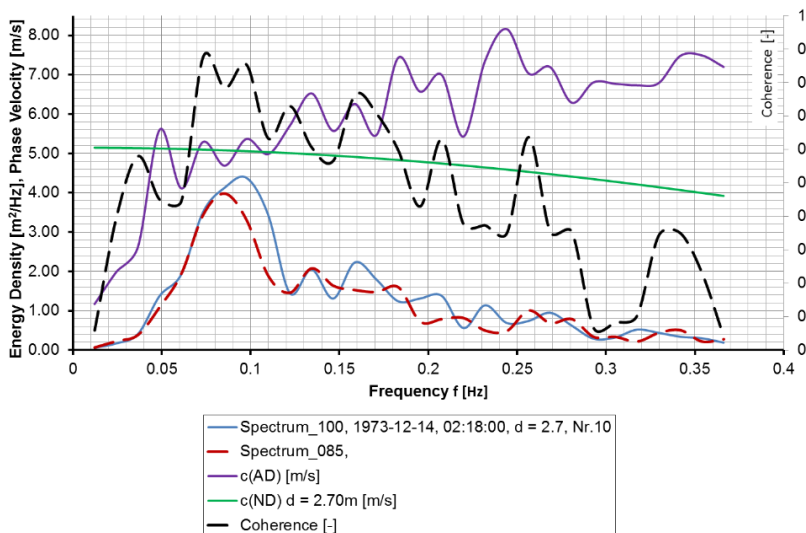


Abb. 18: Energiedichte-Spektren der Messung 10 zusammen mit der quasi gemessenen oszillierenden Phasengeschwindigkeit  $c(AD)$  bei hohen Kohärenz-Werten. Zum Vergleich ist die Phasengeschwindigkeit  $c(ND)$  entsprechend der klassischer Dispersionsrelation dargestellt.

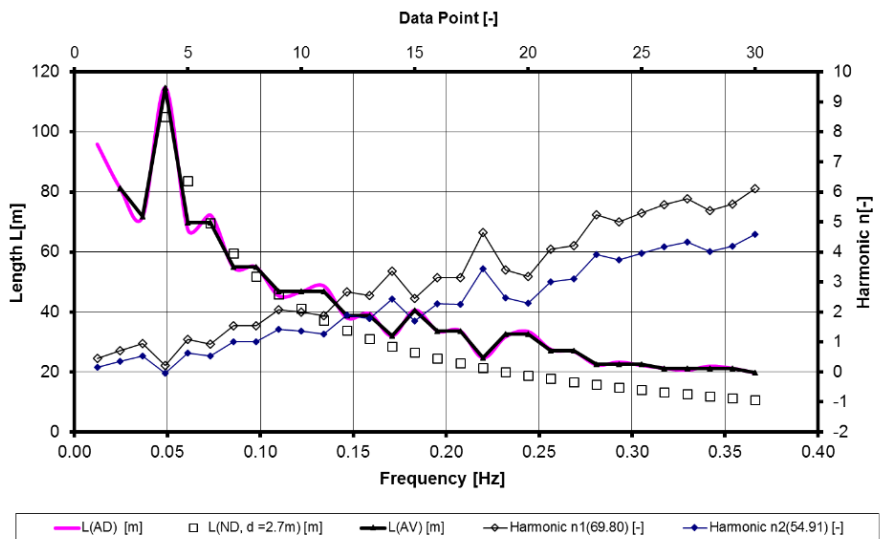


Abb. 19: Längen der Wellenkomponenten  $L(f)$  und Ordnungszahlen  $n(f)$  der Beckenschwingungen.  $L(AV)(f)$  sind die geglätteten Werte von den auf Messungen basieren Werten  $L(AD)(f)$ , während  $L(ND)(f)$  die theoretischen Werte für die Wassertiefe von 2,7m darstellen. Ordnungszahlen der Beckenschwingungen 2er Wellensysteme basierend auf den genannten Längen der ersten Harmonischen.

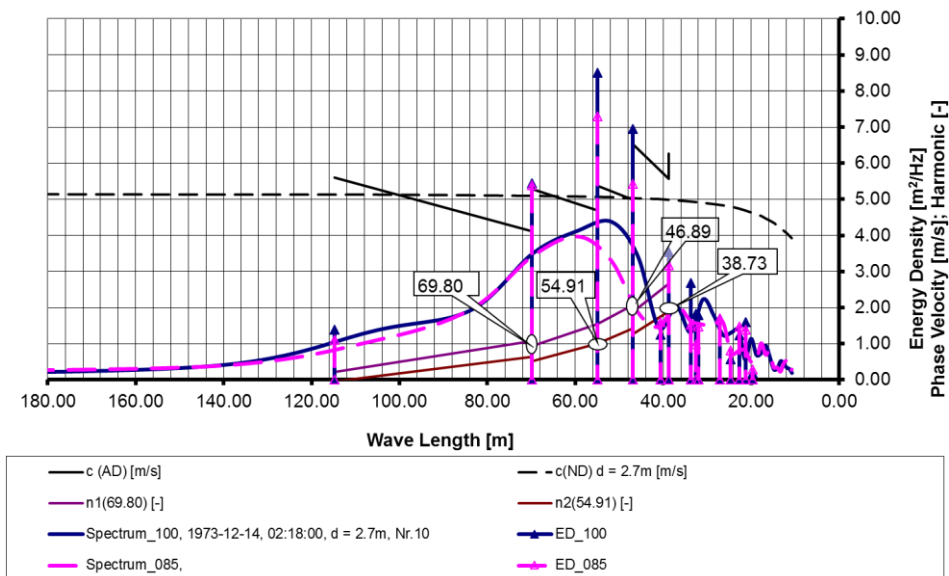


Abb.20: Unter Verwendung der klassischen Dispersionsrelation auf die Längensachse transformierte Energiedichte-Spektren der Messung 10 sowie Linienspektren der Energiedichte  $ED(L)$ , berechnet auf der Grundlage des anomalen Längenspektrums  $L(AD)(f)$ . Weiterhin sind die Phasengeschwindigkeiten und Ordnungszahlen der Beckenschwingungen als Funktion der Wellenlänge dargestellt.

Während Abb. 18 neben den Energiedichte-Spektren die quasi gemessene oszillierende  $gl_{021}$

*bal anomale*) Phasengeschwindigkeit  $c(AD)(f)$  im Vergleich zur theoretischen Phasengeschwindigkeit  $c(ND)(f)$  (entsprechend der klassischen Dispersionsrelation) zeigt, sind in Abb.19 das aus der Funktion  $c(AD)(f)$  ableitbare Wellenlängenspektrum  $L(AD)(f)$  und Ordnungszahlen von Beckenschwingungen (gemäß Formel (1)) basierend auf den ersten Harmonischen (= gemittelte Bezugswellenlängen)  $L_{1A} \approx 69,8\text{m}$  bzw.  $L_{1B} \approx 54,91\text{m}$  enthalten. Die zugehörigen *zweiten* Harmonischen haben die Längen  $L_{2A} \approx 46,89\text{m}$  bzw.  $L_{2B} \approx 38,73\text{m}$ . Somit ist der breite Peak - wie bereits aus der Gestalt der Funktion der Phasengeschwindigkeit  $c(AD)(f)$  im Bereich des Peaks in Abb.18 ersichtlich – auf etwa 4 Resonanzstellen im Frequenzbereich  $0,05 \leq f \leq 0,135\text{Hz}$  zurückzuführen.

Unter Verwendung des Bildungsgesetzes  $L(n) = L(n=0)/(n+1)$  kann auf Grundfrequenzen  $L_{0A} \approx 140\text{m}$  bzw.  $L_{0B} \approx 115\text{m}$  geschlossen werden, die bezüglich einer etwa maßgebenden Distanz Riff – Strand Bedeutung haben können, wenn auch die hierfür angezeigten Energiedichten relativ gering erscheinen.

Abb.20 zeigt die Transformation der Daten aus den Abbildungen 18 und 19 auf die Längengachse. Diese erscheint für die Darstellung des Ergebnisses besonders geeignet zu sein, weil die Resonanzstellen nicht nur durch die Ordnungszahlen der Harmonischen sondern auch durch Sprünge in der Funktion der quasi gemessenen Phasengeschwindigkeiten  $c(AD)(L)$  zusammen mit den aufsummierten Energiedichten  $ED(L)$  deutlich werden.

Als besonders bemerkenswert sei somit herausgestellt, dass bei hochenergetischen Sturmsituationen nicht nur multimodale sondern auch (breite) *monomodale* Energiedichtespektren offenbar von mehreren benachbarten Resonanzstellen repräsentiert werden können, wobei zugehörige Abschnitte anomaler und normaler Dispersion im *gesamten Frequenzbereich hoher Energiedichten* einander abwechseln.

Hierdurch wäre auch für den *gesamten energiereichen* Teil des Spektrums die *im Mittel* anomale Dispersion erklärbar, - ähnlich wie dies bezüglich des gesamten sich zwischen Radiowellen und Röntgenstrahlen erstreckenden Spektralbereiches elektromagnetischer Wellen der Fall ist, vergl. Abb. 2 in [14] bzw. Fig. 1 in [15].

Eine gesonderte Betrachtung zu Resonanz und anomaler Dispersion enthält [23].

#### 4.1 Anhang 1: Bilddokumente zum Messprofil vor den Sturmtiden vom 13./14.12.1973

Zustand des Messprofiles nach dem Ablauf von 3 Sturmtidenfolgen im November und Dezember 1973 (19./20.11., 24./25.11. und 6./07.12.1973).

Vom Dünenfuß erodiertes Material hatte sich weitgehend flächendeckend auf dem Strand abgelagert. Da sich Messgeräte und Messkabel unter Sand befanden und dieselben mit Maschinenhilfe freigelegt werden mussten, waren zeitweilig Sanddepots entstanden, Bild 1.

Nachdem bereits während des Ablaufes der vorausgegangenen Sturmtidenfolgen der größte Teil der an den Messpfählen montierten Messgeräte fehlerhaft geworden waren, standen für die Messwertaufnahme auf Magnetband während der Sturmtidenfolge vom 13. und 14. 12. 1973 lediglich noch ein 2-Kanal Strömungsmesser an Messposition 85m sowie die Wellenpegel an Messpositionen 100m und 85m zur Verfügung.



Bild 1: Messpositionen 60m, 80m und 100m. Stationen 120m und 128m beschädigt.



Bild 2: Führung der Kabeltrasse auf der seeseitigen Dünenböschung und im Messprofil unterflur entlang der Messpfähle an Stationen 0m, 20m und 40m.





Bild 3: Relative Lage des Laufsteges zum Dünenfuß nur wenig landwärts vom Profil-Null entfernt (Stationspfahl 0m unmittelbar seewärts des Laufsteges) sowie die Führung der Kabel unter der Beplankung des Laufsteges.

Aufnahmen: ca.11.12.1973

#### 4.2 Anhang 2: Bilddokumente zum Messprofil nach den Sturmtiden vom 13./14.12.1973



Bild 4: Der hohe Pfahl bezeichnet die Messposition 40m bei niedrigem Wasserstand.





Bild 5: Relative Lage des Laufsteges zum erodierten Dünenfuß.



Bild 6: Erodierter Bereich der Düne landwärts des Laufsteges.

Aus dem gesamten Profil sind derart große Sandmengen seewärts transportiert worden, dass die ehemals nahe unter der Strandoberfläche verlegten Messkabel nunmehr vollständig freiliegen und zwischen ihren jetzt sichtbaren Stützstrukturen (Abstand 5m) durchhängen.

Als Folge des immensen Materialabtrages vom Strand erreicht die Strandbenetzung etwa bei mittlerem Hochwasserstand nunmehr annähernd die Messstation 20m (Begrenzung der beschneiten Fläche am rechten Rand von Bild 4).

Die Erosion durch Welleneinwirkung am Dünenfuß hat örtlich unterschiedlich die Ausbildung einer steileren Böschungsneigung bewirkt und erforderte zur Entwirrung der Kabel am Geländeübergang von der Düne auf den Strand (Bild 5) die Neupositionierung der ehemals dicht unter den Laufstegplanken verlegten Messkabel an der Strandoberfläche, Bild 6.

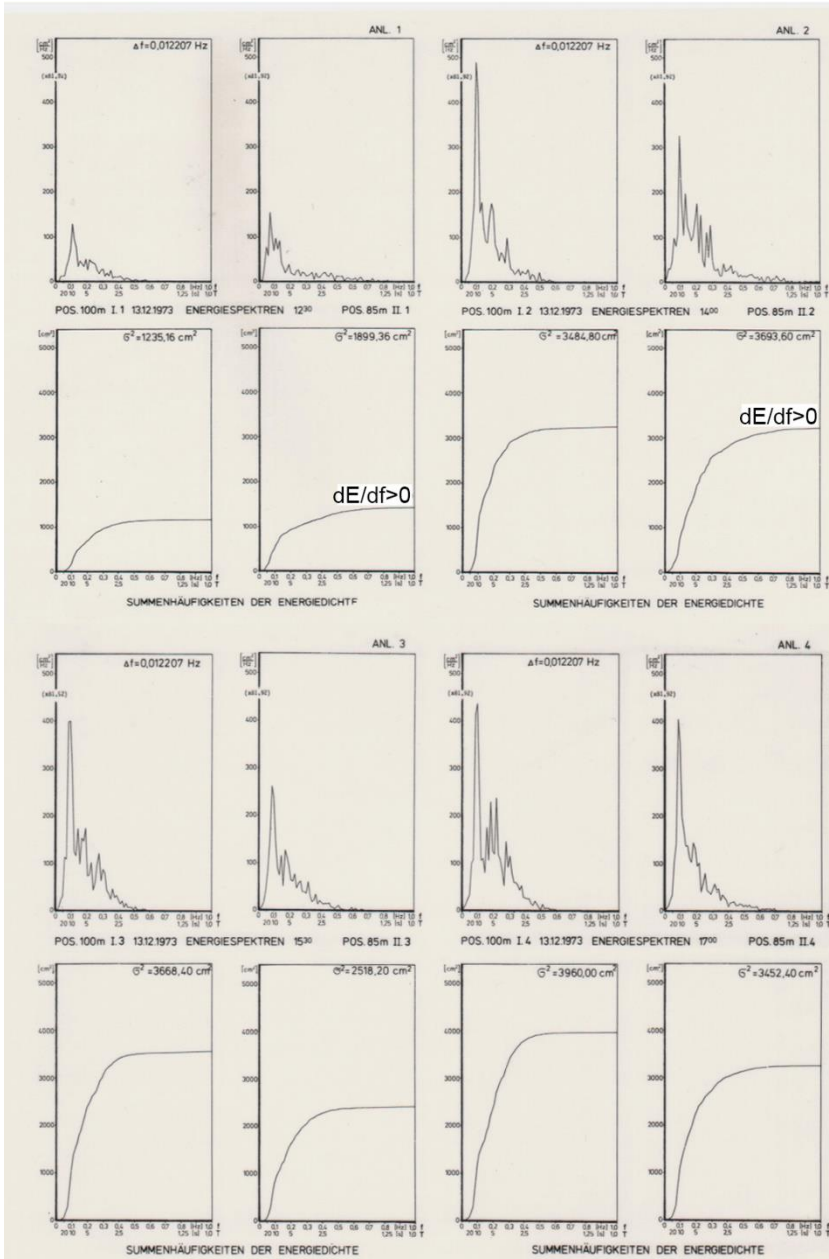
Die Stützkonstruktion des Laufsteges ist fast über dessen gesamte Gründungstiefe (ca. 3m) freigelegt mit der Folge, dass die Stabilität nicht mehr gewährleistet ist und die Struktur bereits örtlich versagt hat.

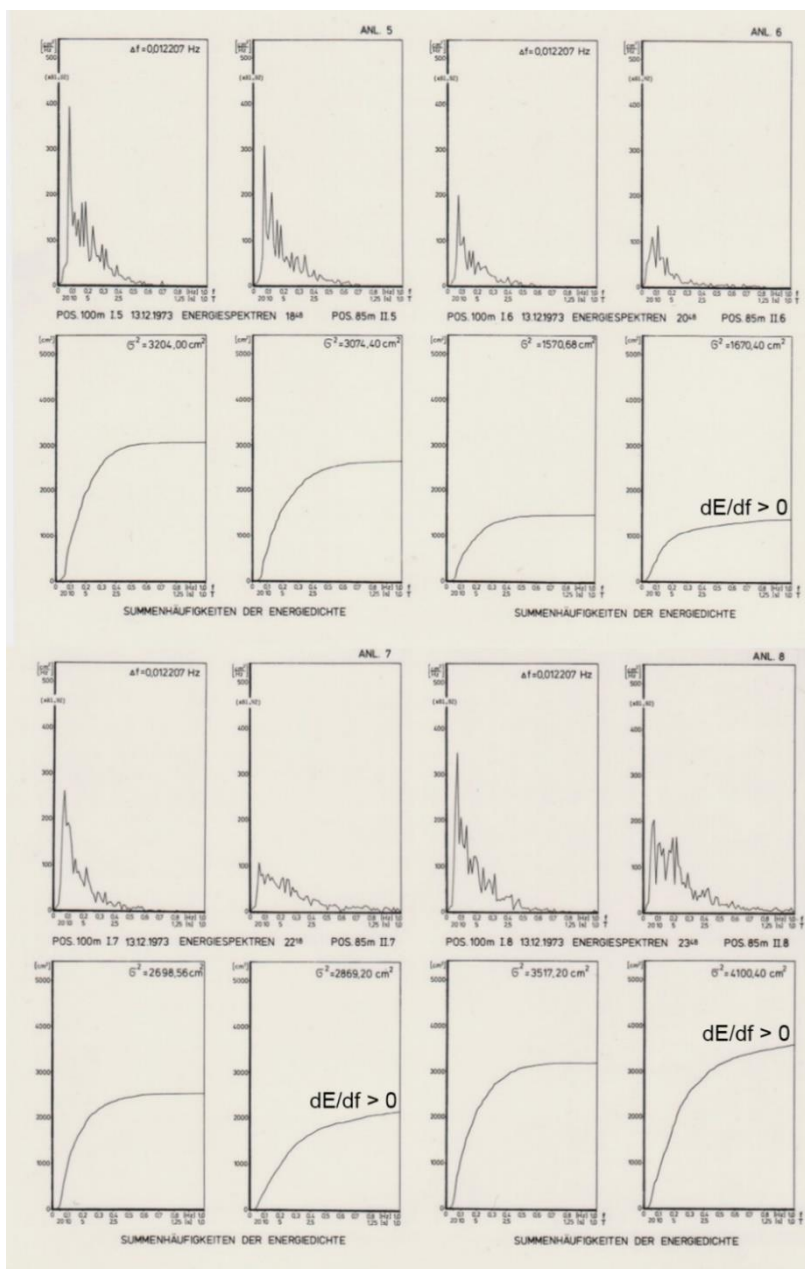
Die Rückverlegung des Dünenfußes während des Ablaufes der Sturmtidenfolge infolge Erosion wird auf ca. 12m geschätzt.

Aufnahmen: ca. 15.12.1973

### 4.3. Anhang 3: Spektralfunktionen

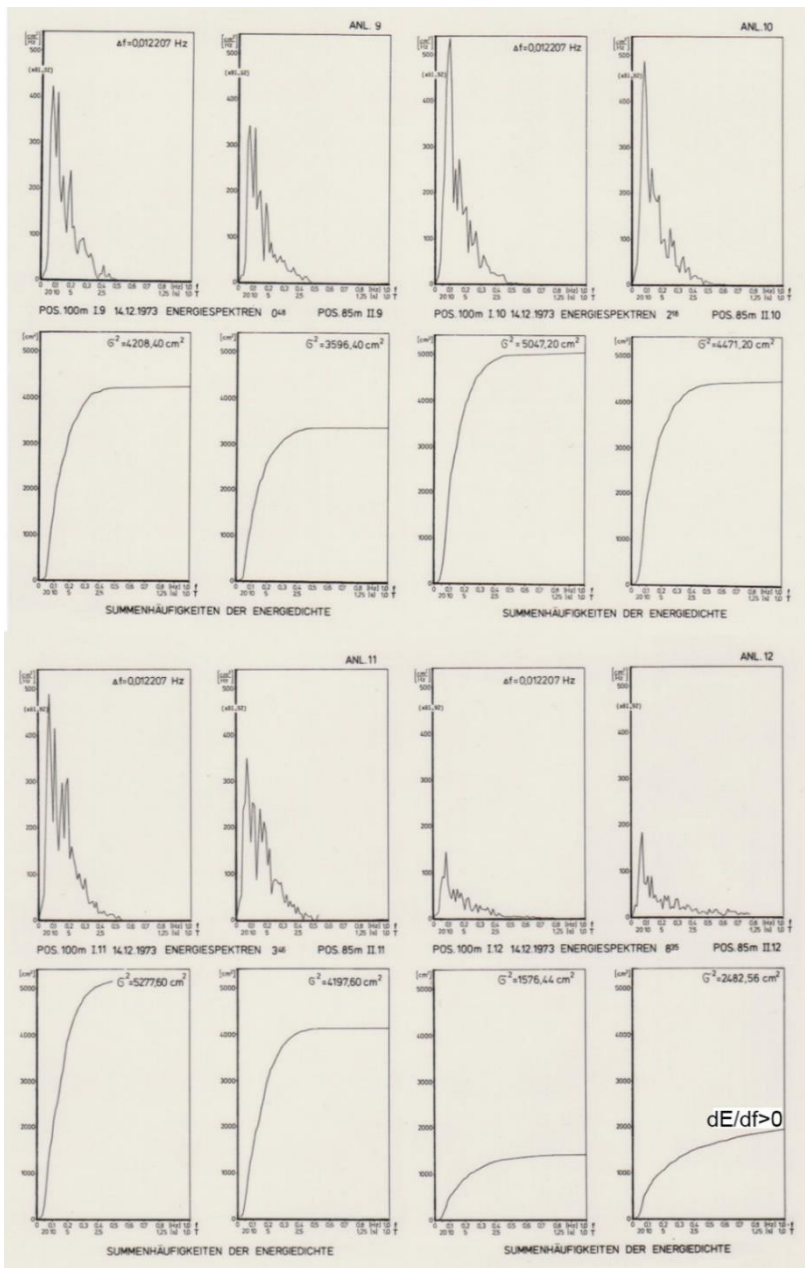
Energiespektren und Summenhäufigkeiten der Energiedichten bezüglich der Messstationen 100m und 85m jeweils für den Frequenzbereich  $0 \leq f \leq 1\text{Hz}$  [4]. Jeder der 16 Datensätze enthält auch die Zahlenwerte der Varianzen  $\sigma^2$  bezüglich der Berechnungsbandbreite 3,125Hz.

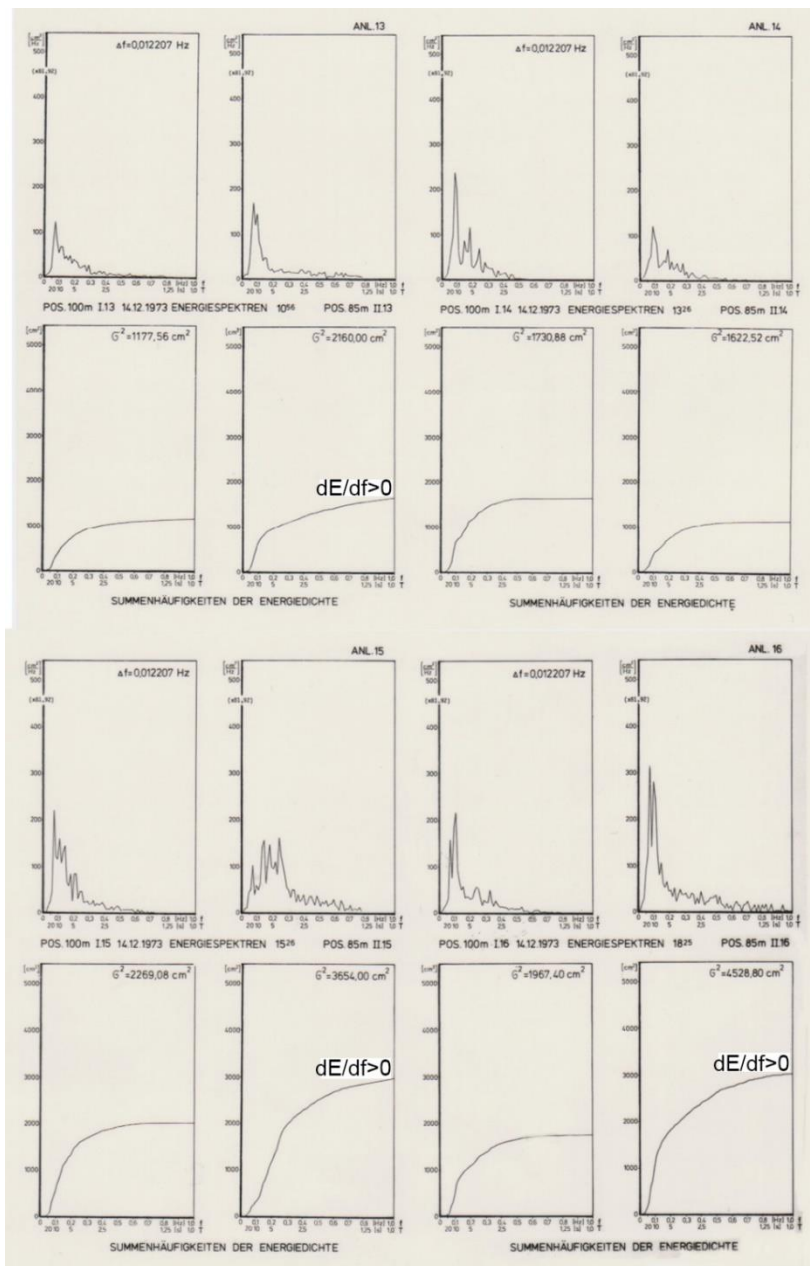




Die Angabe der Energiedichte in  $m^2/Hz$  in den Energiedichte-Spektren erfordert die Multiplikation der Ordinatenwerte mit dem Faktor 0,008192.

Das angegebene Steigungsmaß  $dE/df > 0$  bezieht sich bei Station 85m auf die Frequenz 1Hz und bezeichnet mehr oder weniger *intensiv brechende* Wellen, vergl. auch Abb.15.







#### 4.4 Anhang 4: Bilddokumente zu Wellenmessungen im Winter 1973 an der Westküste von Sylt



Bild 7: Messprofil zu Beginn der Messkampagnen mit ausbrandenden Wellen etwa bei MThw



Bild 8: Einzelner Sturzbrecher.

Hier etwa bei MThw.  
seewärts der  
Messstation 100m.

Während des Ablaufes  
der Sturmtidenfolge  
vom 13./14.12.1973 aus-  
schließlich küstenwärts der  
Messstation 100m.



Bild 9: Sturzbrecher  
zweier Wellensysteme.

## 5. Schriftenverzeichnis

- [1] F. Büsching, „Über Orbitalgeschwindigkeiten irregulärer Brandungswellen,“ *Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der TU Braunschweig*, H. 42, pp. 0-256; <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00057951>, 1974.
- [2] A. Führböter und F. Büsching, „Wave Measuring Instrumentation for Field Investigations on Breakers,“ *Proc. Ocean Wave Measurement and Analysis, Vol. I, New Orleans, USA*, pp. 649-668, <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00056512>, 1974.
- [3] F. Büsching, „On Energy Spectra of Irregular Surf Waves,“ *Proceedings, 15th Internat. Conference on Coastal Engineering, Honolulu, Hawaii, USA*, pp. 539-559; <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00056915>, 1976.
- [4] F. Büsching, „Über die Änderung von Wellenperioden im Brandungsbereich (Verteilung der Wellenenergie in Brandungsspektren),“ *Mitt. des Leichtweiß-Instituts*, H.47, *TU Braunschweig*, pp. 122-164; <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00045452>, 1975.
- [5] F. Büsching, „Anomalous Dispersion of Surface Gravity Waves in the Near Shore Zone,“ *Proceedings 16th International Conference on Coastal Eng., Hamburg*, pp. 247-267; <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00056918>, 1978a.
- [6] F. Büsching, „Wave Deformation due to Decreasing Water Depth,“ *Mitt. des Leichtweiß-Instituts*, H.63, *TU Braunschweig*, pp. 167-217; <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00045508>, 1978b.
- [7] F. Büsching, „Anomale Dispersion zur Darstellung der küstennahen Wellenverformung,“ *Die Küste*, Bd. 34, pp. 159-183; <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00047034>, 1979.
- [8] F. Büsching, „Doppler Aspects of Near-Shore Wave Transformation,“ *EUROMECH 114, Wladyslawowo, Poland*, pp. 1-6, 1980a.
- [9] F. Büsching, „Neue Aspekte bei der Beurteilung küstennaher Wellentransformation und Energieumwandlung,“ *8. Aufbauseminar MEERESTECHNIK, TU Berlin*, pp. D1-D22; <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00049347>, 1980b.
- [10] F. Büsching, „Analogous Dispersion Properties of Surf Zone and Electromagnetic Waves,“ *Proceedings 18th International Conference on Coastal Eng., Capetown, South Africa*, pp. 154-171; <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00056917>, 1982.
- [11] F. Büsching, „Resonance Absorption Phenomena of Surf Zone Wave Kinematics,“ 1). *Proceedings, 20th I.A.H.R.-Congress, Vol.VII, Moscow, USSR*. 2). *Proceedings, OCEAN ENGINEER-ING VII, Taipei, Republik China*, pp. 141-145, 12pages; <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00053995>, 23-24 September 1983.
- [12] F. Büsching und N. Speranski, „Dispersionseffekte bei Schwerewellen im Flachwasser,“ *Die Küste*, H. 58, pp. 161-177; <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00047795>, 1996.
- [13] N. Speranski und F. Büsching, „Dispersion Effects of Shallow Water Gravity Waves,“ *Bielefeld Univ. of Applied Sciences, Architektur & Bauingenieurwesen*.



*Papers on Coastal Engineering*, pp. 1-18; <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00047043>, 1996.

- [14] F. Büsching, „Sturmwellenresonanz an der Westküste der Insel Sylt,“ *Die Küste*, H. 67, pp. 51-82; <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00047046>, 2003 .
- [15] F. Büsching, „Wave Resonances Detected in a Wave Tank and in the Field.,“ *Fifth International Symposium WAVES 2005, Madrid, Spain.*, pp. Paper number 134. p. 1-12 & 1-2.; <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00043938>, 3 - 7 July 2005.
- [16] F. Büsching, „Phasensprung bei der partiellen Reflexion irregulärer Wasserwellen an steilen Uferböschungen,“ *HANSA, H.5 sowie Binnenschifffahrt, H. 9 & 10*, pp. 87-98 bzw. 73-77 und 64-69; <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00047044>, 2010 .
- [17] F. Büsching, „Phase Jump due to Partial Reflection of Irregular Water Waves at Steep Slopes,“ *Proc. 3rd Int. Conf. on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection, COASTLAB 2010, Barcelona, Spain*, pp. Paper no. 67, pp 1 - 10; <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00047044>, 28th - 1st September & October 2010.
- [18] F. Büsching, „Komplexe Reflexionskoeffizienten für Wasserwellen - Zur Klassifizierung von Brandungseffekten an Küstenschutzbauwerken -,“ *Die Küste*, H. 78, pp. 235-258; <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00047022>, 2011.
- [19] F. Büsching, „Complex Reflection Coefficients of Water Waves - On the Classification of Types of Breakers -,“ *Proc. Coastlab 12, 4th Int. Conf. of the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection, Ghent, Belgium*, pp. 99-108, Extended Version 16 pages; <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00045344> ; ppt: <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00045521>, 17-20 September 2012.
- [20] W. Bascom, „Waves and Beaches,“ *Anchor Books; Doubleday & Company, Inc. Garden City, New York*, pp. 0-267, 1964.
- [21] N. P. Holliday und et al., „Were extreme waves in the Rockall Trough the largest ever recorded?,“ *Geophysical Research Letters*, Nr. Vol. 33, L05613, p. 4 pages, 2006.
- [22] J. Chappell und Wright, L. D., „Surf Zone Resonance and Coupled Morphology,“ *Proc. 16th Coastal Engineering Conference, Hamburg, Germany*, pp. 1359-1377, 1978.
- [23] F. Büsching, „Resonanz und Anomale Dispersion bei Wasserwellen,“ *Digitale Bibliothek Braunschweig; Publikationsserver der TU Braunschweig*, pp. 1-14; <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00056747>, 2014.

Die Bilddokumente der Anhänge 4.1, 4.2 und 4.4 entstammen Super-8-Filmen des Verfassers.